PHILIPS



CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Analoge schakelingen

Leerlingboek CS 1

Philips Nederland B.V. - Afd. Onderwijsactiviteiten

Derde, herziene druk 1978

Vierde druk 1979

Vijfde druk 1981

PHILIPS



CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Analoge schakelingen

Leerlingboek CS 1

Philips Nederland B.V.- Afd. Onderwijsactiviteiten

OVER DEZE SCANS

Als basis voor deze scans hebben wij gebruik gemaakt van de door 'Freeservicemanuals' in 2018 gemaakte scans. Wij hebben de pagina's van deze scans echter zorgvuldig naar de originele staat gerestaureerd, onder andere door alle persoonlijke notities en de antwoorden op alle oefeningen en vragen te verwijderen.

Derde, herziene druk 1978

Vierde druk 1979

Vijfde druk 1981

INHOUDSOPGAVE

b

C 1

INLEIDING TOT DE TRAJECTEN C EN D VAN DE CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

We beginnen aan een van de twee laatste trajecten C en D van de cursus "Bedrijfselektronica".

De gehele cursus bestaat uit vier trajecten:

A. Basis elektronica.

B. Componenten.

C. Analoge schakelingen.

D. Digitale schakelingen.

In het A-traject zijn de onderwerpen uit de wiskunde, de natuurkunde en de elektriciteitsleer behandeld, die nodig zijn bij de elektronicavakken. Bovendien is er een begin gemaakt met het meten in de elektronica.

Behandelde onderwerpen in het A-traject zijn:

- Iets van rekenen, algebra, meetkunde en goniometrie.
- Iets van natuurkunde (mechanica).
- De grondbeginselen van de gelijkstroomtheorie.
- De grondbeginselen van de wisselstroomtheorie.
- Het meten met een universeelmeter en met een oscilloscoop.
- Enkele bijzondere onderwerpen zoals resonantie, filters en gemoduleerde signalen.

Het B-traject bevat passieve en actieve componenten die veelvuldig in elektronische schakelingen worden toegepast.

Onder "actieve" componenten verstaat men die componenten waarmee vermogen versterkt kan worden; met "passieve" componenten is dit niet het geval.

Onderwerpen in het B-traject zijn:

- Weerstanden, condensators, spoelen en transformators.
- Verbindingen, in het bijzonder de coax-kabel.
- Halfgeleiderdioden, transistors, FET's en MOST's.
- Diac, thyristor en triac.
- Gasgevulde diode, vacuüm diode, triode en pentode.

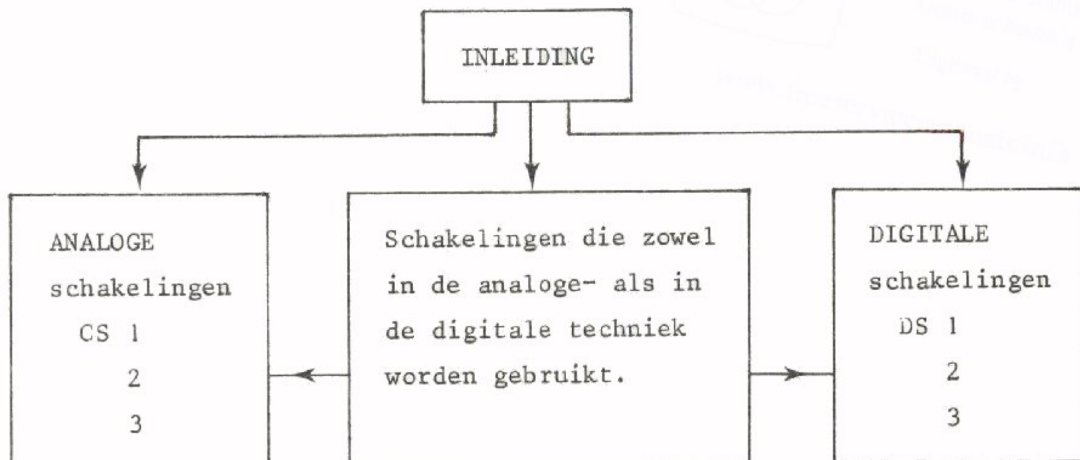
VRAAG

Welke van de genoemde componenten zijn actieve componenten?

OPBOUW VAN DE TRAJECTEN C EN D

In de trajecten C en D bereiken we het doel van de hele cursus, namelijk: "Met begip werken aan elektronische schakelingen".
De leerstof uit het A- en B-traject kan hiertoe als voorbereiding worden gezien.

Onderstaand blokschema geeft een grove indeling van de C- en D-delen.



Van de drie blokken na de inleiding vormen de "analoge schakelingen" en de "digitale schakelingen" de twee hoofdtrajecten. Elk van deze hoofdtrajecten kan afzonderlijk behandeld worden.

Hiertoe zijn de lessen over de begrippen "analoog" en "digitaal", de dubbelstraal-oscilloscoop en de voedingsschakelingen in de trajecten C en D opgenomen.

Er zijn twee redenen voor deze splitsing.

- De voornaamste reden is dat beide technieken zich in de afgelopen jaren als afzonderlijke, zelfstandige vakgebieden hebben ontwikkeld.
- Hierop aansluitend is het nu mogelijk om cursisten óf alleen in de analoge techniek, óf alleen in de digitale techniek op te leiden.

Dit maakt het raadzaam de cursisten de mogelijkheid te bieden zich óf uitsluitend in de analoge techniek, óf uitsluitend in de digitale techniek te bekwamen.
Overigens kunnen cursisten die van één van deze technieken al veel weten, in de andere techniek apart worden bijgeschoold.

Wat de begrippen "analoog" en "digitaal" betekent, trachten wij in deze inleidende les duidelijk te maken.

HET BEGRIP "INFORMATIE" IN DE TECHNIEK

Het woord "informatie" kennen we al uit ons dagelijks leven.

- Op een informatie-bureau van de ANWB kunnen we alle mogelijke inlichtingen verkrijgen over toerisme.
- De krant geeft informatie (inlichtingen) over gebeurtenissen in onze stad, in onze streek, in ons land en in de wereld.
- Deze lessen geven informatie over de elektronica.
- Een natuurkundeboek geeft informatie over de natuurkunde.
- Een bouwtekening geeft informatie over de manier waarop iets in elkaar moet worden gezet.
- Via het telefoonnummer 003 kunt u informatie over het weer verkrijgen,

In al deze gevallen verstaan wij onder het begrip "informatie": inlichtingen bericht, boodschap, gegevens, kortom alles waardoor wij iets te weten komen.

Ook in de techniek wordt het woord "informatie" veel gebruikt.

Voorbeelden zijn:

- Een klok geeft informatie over de tijd.
- Een thermometer geeft informatie over de temperatuur.
- Een weegschaal geeft informatie over het gewicht.
- Een ampèremeter geeft informatie over de grootte van een stroom.
- De stand van een schakelaar geeft eventueel met het tekstplaatje informatie of een circuit in- of uitgeschakeld is.
- Een signaleringslampje geeft de informatie of een apparaat "uit" of "aan" staat.
- De vergrendeling van een badkamer geeft de informatie of de badkamer "bezet" of "vrij" is.

Uit deze voorbeelden blijkt dat men in de techniek onder informatie verstaat:

De *waarde* van een natuurkundige grootheid.
(tijd, temperatuur, gewicht, stroom, enz.)
De *toestand* van een component.
(schakelaar "open" of "gesloten", apparaat "aan" of "uit", badkamer "bezet" of "vrij").

ANALOGE EN DIGITALE INFORMATIE

Informatie komt in de techniek in twee verschillende vormen voor. We maken onderscheid tussen *analoge* informatie en *digitale* informatie. Wat het verschil daartussen is maken we duidelijk aan de hand van een aantal voorbeelden.

Voorbeelden van *analoge* informatie zijn:

- De temperatuur die een kwikthermometer aangeeft.
- De stroom die een draaispoelmeter aanwijst.
- De snelheid die de snelheidsmeter van een auto weergeeft.

In al deze gevallen volgt het meetinstrument *elke*, ook de kleinste verandering van de gemeten grootheid.
Deze instrumenten geven een informatie die *elke* waarde kan aannemen tussen een minimum en een maximum waarde.

Bijv. *elke* temperatuur	tussen -5 ^{0}C en 100 ^{0}C	
elke stroom	tussen 0 mA en 100 mA	
elke snelheid	tussen 20 km/uur en 150 km/uur.	

Hoe nauwkeurig deze waarde af te lezen is, hangt af van de afleesnauwkeurigheid van het instrument en wordt o.a. bepaald door de afmetingen en de onderverdeling van de schaal.

Het kenmerk van *analoge* informatie is, dat deze tussen een minimum en een maximum waarde in, *elke* waarde kan aannemen. Men noemt dergelijke waarden ook wel "continu variabel".

Voorbeelden van *digitale* informatie zijn:

- De tijd weergegeven door een klok met cijferindicatie (zonder wijzers), waarvan het laatste cijfer elke minuut verspringt.
- Het in- of uitschakelsignaal dat een kamerthermostaat geeft aan de verwarmingsketel als de temperatuur in de kamer beneden een bepaalde waarde is gedaald of boven een bepaalde waarde is gestegen.
- De stroom weergegeven door het aantrekken of afvallen van een relais (wel of geen stroom).

In al deze gevallen volgt het instrument *sprongsgewijze* bepaalde veranderingen van de gemeten grootheid. Deze instrumenten geven een informatie die slechts een *beperkt aantal* waarden kan aannemen en geen enkele waarde daartussen in.

Bijv. De tijd van een cijferklok: 11 uur 36, 11 uur 37, 11 uur 38 maar *niet* 11 uur 36 en 24 seconden.

De afstand, aangegeven door kilometerteller: 1037 km, 1038 km, 1039 km maar *niet* 1037,1 km.

De temperatuur, gesignaleerd door thermostaat: "beneden 22 ^{0}C" óf "boven 22 ^{0}C" maar *niet* 21 ^{0}C of 23 ^{0}C.

Het kenmerk van *digitale* informatie is dus, dat deze slechts een *beperkt aantal* vaststaande waarden kan aannemen, waarbij géén tussenwaarden mogelijk zijn. Men noemt dergelijke waarden, die slechts sprongsgewijs in een andere waarde kunnen overgaan "discrete waarden".
Voorbeeld: getallen "1037 - 1038", schakelaar "gesloten-open" enz.

Ter vergelijking enkele voorbeelden waarin het verschijnsel tussen *analoge* en *digitale* informatie tot uiting komt.

- De kwikthermometer in een huiskamer geeft informatie over *elke* waarde van de kamertemperatuur.
  De kamerthermostaat geeft alleen de informatie of de kamertemperatuur hoger of lager is dan bijv. 22 ^{0}C.
- Een stroommeter (in serie met de spoel van een relais) geeft informatie over *elke* waarde van de stroom door het relais.
  Het aantrekken van het relais geeft alleen de informatie dat de stroom door het relais hoger is dan een bepaalde waarde.
- De snelheidsmeter van een auto geeft informatie over *elke* waarde van de snelheid.
  De km-teller geeft alleen sprongsgewijze informatie over het aantal afgelegde hele kilometers, maar geen tussenwaarde.
- De tijd weergegeven door een klok met wijzers geeft informatie over *elke* waarde van de tijd (ook delen van een minuut).
  Een klok met cijferindicatie (zonder wijzers) geeft alleen sprongsgewijze informatie over elke verstreken hele minuut, maar geen tussenwaarden.

Probeer zelf twee andere voorbeelden van *analoge* en *digitale* informatie te bedenken.

ANALOOG	DIGITAAL
o	o
o	o

OEFENINGEN

Hieronder worden een aantal voorbeelden van informatie gegeven.
Ga voor elk geval na, of er sprake is van analoge- of van digitale informatie.

1. De positie van de kralen van een telraam geven ______ informatie.

2. De diameter van een as wordt met een schuifmaat gemeten.

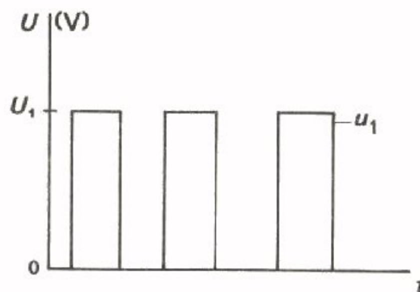
   De afstand tussen de bekken van de schuifmaat geeft ______ informatie.

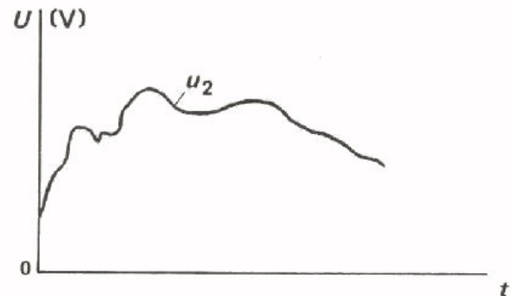
3. Voor het meten van een onbekende weerstand wordt een brug van Wheatstone gebruikt. De brug is samengesteld uit twee bekende vaste weerstanden, de onbekende weerstand en een weerstandsbank (ook wel decadebank genoemd). De gemeten weerstand wordt door de standen van de knoppen op de decadebank als ______ informatie weergegeven.

4. De verkeerslichten rood, geel en groen bij een kruispunt geven ______ informatie.

5. Een barometer geeft over de luchtdruk ______ informatie.

6.

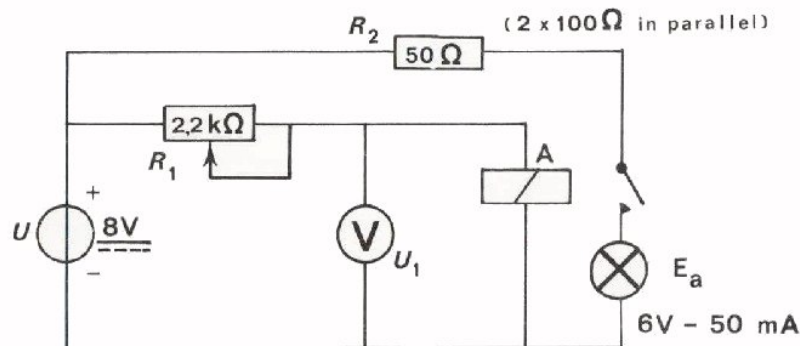




Uitsluitend de spanningsniveaus 0 en U_1 vormen ______ informatie.

Elke waarde van de spanning u_2 vormt ______ informatie.

OPDRACHT: HET VERSCHIL TUSSEN ANALOGE EN DIGITALE INFORMATIE



- Bouw deze schakeling.
- Zet de potentiometer op maximale weerstand (geheel linksom).
- Stel de gelijkspanningsbron in op 8 V.
- Regel de potentiometer langzaam van maximale naar minimale weerstand. Let op de meter en het lampje.
- Bij draaiing van de potentiometer verloopt de spanning over de spoel

  geleidelijk / sprongsgewijs van [   ] V naar [   ] V

- De spanning over het lampje verloopt bij aantrekking van het relais

  geleidelijk / sprongsgewijs

- De voltmeter geeft **analoge / digitale** informatie over de spanning op de relaisspoel.
- Het lampje geeft **analoge / digitale** informatie over de spanning op de relaisspoel.
- De voltmeter kan **elke / een beperkt aantal** waarde(n) van de spanning over de relaisspoel weergeven.
- Het lampje kan **elke / een beperkt aantal** waarde(n) van de spanning over de relaisspoel weergeven.

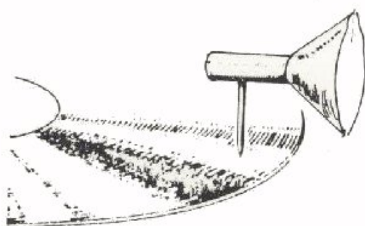
INFORMATIE-VERWERKING

Het beschikken over informatie krijgt pas zin, als we iets gaan doen met die informatie.
De informatie moet "verwerkt worden".

We bekijken een paar simpele voorbeelden van *informatie-verwerking*.

a. De geluidsinformatie die zich op een grammofoonplaat bevindt moet "verwerkt" worden tot geluid. ("verwerken" betekent hier: hoorbaar maken).
b. Aan de kassa van een winkel moeten de prijzen van gekochte artikelen "verwerkt worden" tot een eindbedrag. ("verwerken" betekent hier: noteren en optellen).

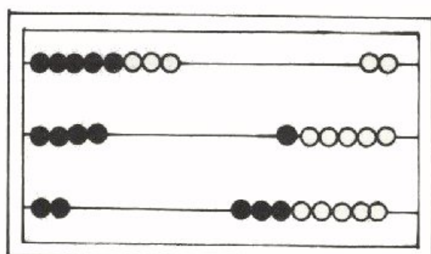
Deze informatie-verwerkingen kunnen met *mechanische hulpmiddelen* gerealiseerd worden:



a. Bevestigt men een naald aan de conus van een luidspreker en laat men de naald in de groef van een draaiende grammofoon lopen, dan wordt de geluidsinformatie hoorbaar.



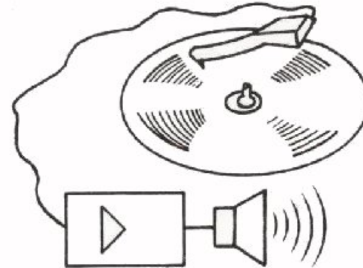
Edison maakte van dit principe gebruik bij zijn Phonograph.



b. De prijzen zijn f 2,--, f 6,-- en f 8,--. Voor elke gulden schuiven we één kraal van het telraam naar rechts.
Voor elke prijs gebruiken we een "nieuwe regel". Het aantal kralen aan de de rechterkant, zestien, komt overeen met het eindbedrag van f 16,--.

INFORMATIE-VERWERKING

Deze informatie-verwerkingen van de vorige pagina kan men ook met *elektronische hulpmiddelen* uitvoeren:



a. De grammofoonplaat wordt afgetast met een "pick-up element", dat de geluidsinformatie van de plaat omzet in een elektrische informatie.
De elektrische informatie wordt versterkt en toegevoerd aan een luidspreker, die de informatie omzet in geluid.
(Analoge, continu-variabele, informatie).

b. Voor het registreren en optellen van prijzen gebruikt men een elektronisch kasregister.
Door middel van druktoetsen (schakelaars) voert men de prijzen als spanningen aan het apparaat toe.
Het register telt ze elektronisch op.
Het eindbedrag wordt zichtbaar gemaakt door middel van oplichtende cijfers (cijferindicatorbuizen) (digitale informatie).

Uit deze voorbeelden is te zien dat elektronische informatieverwerking meer mogelijkheden biedt dan mechanische.
In veel gevallen is het zelfs de enige mogelijke manier.

OMZETTINGEN BIJ ELEKTRONISCHE INFORMATIE-VERWERKING

Om niet-elektronische informatie zoals licht, geluid, temperatuur, etc., elektronisch te kunnen verwerken, zijn één of meer *omzettingen* nodig.

In het voorbeeld van de grammofoonplaat zet het "pick-up element" de trillingen van de naald om in een elektrisch signaal. Dit signaal wordt versterkt en daarna met behulp van een luidspreker omgezet in geluid.

In het voorbeeld van het elektronisch kasregister worden de prijzen met behulp van schakelaars omgezet in elektrische spanningen. Deze spanningen worden elektronisch onthouden en opgeteld waardoor een signaal ontstaat dat de informatie van het eindbedrag bevat. Dit signaal wordt d.m.v. cijferindicatorbuizen omgezet in leesbare cijfers, dus in licht.

De informatie die aan een informatie-verwerkend systeem wordt toegevoerd noemt men *ingangsinformatie*. De informatie die nā de verwerking wordt verkregen noemt men *uitgangsinformatie*.

Voordat een niet-elektronische ingangsinformatie elektronisch kan worden verwerkt, moet deze eerst worden omgezet in elektronische informatie. Componenten die voor deze omzetting zorgen, zijn de zogenaamde *opnemers*. (Microfoon, LDR, NTC, etc.). Meestal moet de elektronische uitgangsinformatie weer omgezet worden in een niet-elektronische. Componenten die hiervoor zorgen noemt men *weergevers* (luidsprekers, lamp, draaispoelmeter, relais, etc.).

Verderop in het C- en D-traject bespreken we een aantal opnemers en weergevers.

1. Een fotodiode is een opnemer / weergever die de elektronische/niet elektronische informatie licht omzet in de elektronische/niet elektronische informatie spanning

2. Een signaallampje is een opnemer / weergever die de elektronische/niet elektronische informatie spanning omzet in de elektronische/niet elektronische informatie licht

3. Een luidspreker is een opnemer / weergever die de elektronische/niet elektronische informatie spanning omzet in de elektronische/niet elektronische informatie geluid

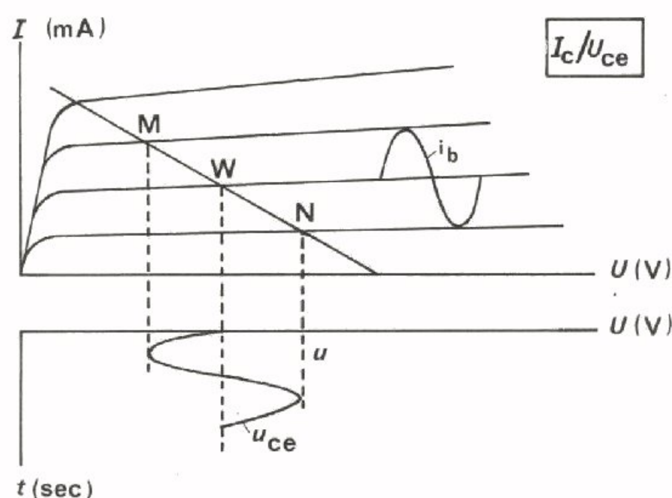
4. Een microfoon is een opnemer / weergever die de elektronische/niet elektronische informatie geluid omzet in de elektronische/niet elektronische informatie spanning

In deze les houden we ons van nu af uitsluitend bezig met het *elektronisch* verwerken van informatie.

ANALOGE INFORMATIE-VERWERKING

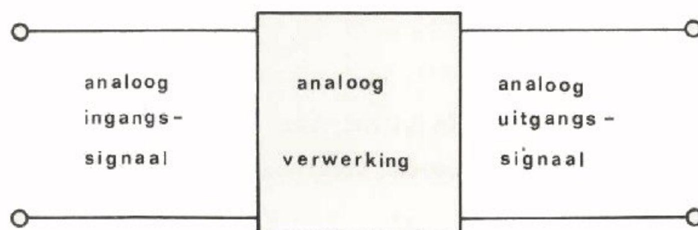


Een voorbeeld van "analoge verwerking" is een transistorversterkertrap voor wisselspanningen.
Het analoge ingangssignaal bestaat uit een (kleine) wisselspanning u_{be},
Het uitgangssignaal is een grotere wisselspanning u_{ce}, die op de fase na, net zo verloopt als de ingangsspanning. Het is óók een analoog signaal.



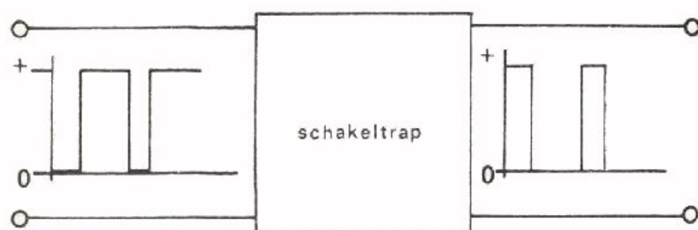
De ingangswisselspanning u_{be} veroorzaakt een basisstroom i_b. Tijdens het verwerken van de stroom i_b doorloopt de transistorinstelling *alle* punten tussen M en N op de belastinglijn.

Tussen M en N ligt het zogenaamde "werkgebied" voor deze verwerking.



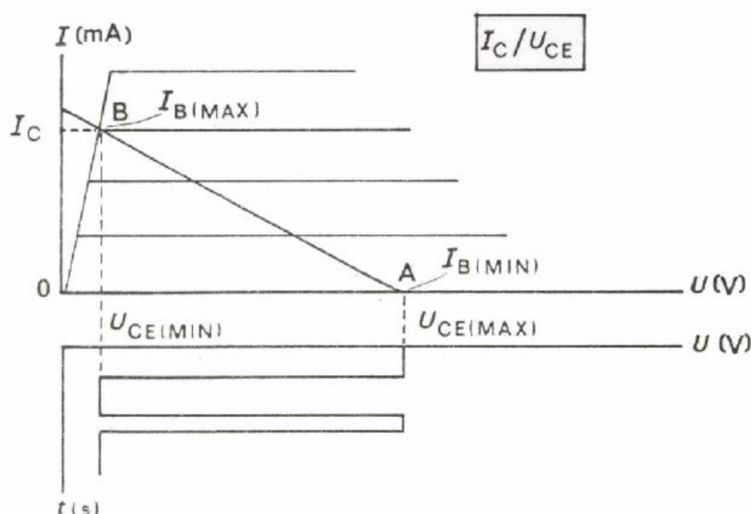
Bij *analoge informatie verwerking* wordt een analoge ingangsinformatie verwerkt tot een uitgangsinformatie, die eveneens analoog is. De verwerkende schakeling moet *elke* insteltoestand in het werkgebied kunnen innemen.

DIGITALE INFORMATIEVERWERKING

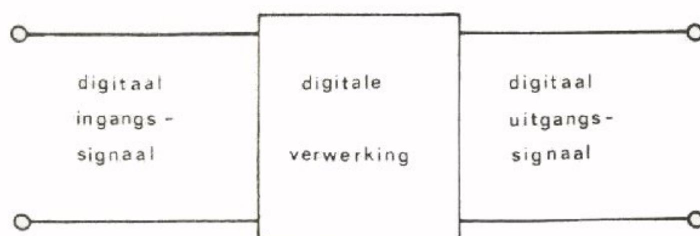


Een voorbeeld van "digitale verwerking" is een transistortrap die als schakelaar fungeert.
Hiermee wordt bijvoorbeeld een relais in- of uitgeschakeld.
Als een NPN-transistor wordt gebruikt is deze bij ingangsspanning nul niet in geleiding en bij een bepaalde positieve ingangsspanning wel in geleiding.

Als ingangssignaal wordt nu óf een spanning nul óf een positieve spanning toegevoerd.
Het ingangssignaal heeft een beperkt aantal waarden, in dit geval twee, een lage en een hoge. Het is een digitale informatie. Het uitgangssignaal is óf een stroom nul óf een stroom I_C die het relais bekrachtigd. Het uitgangssignaal heeft ook slechts twee waarden en is daarom een digitale informatie.



De ingangsspanning is of maximaal (positief) of minimaal (nul).
Bij de maximale waarde is de transistor in het punt B ingesteld.
Is de ingangsspanning minimaal dan is de transistor in het punt A ingesteld
Heeft de ingangsspanning slecht twee bepaalde niveaus, maximum en nul, dan zijn slechts twee instelpunten mogelijk.
De spanning U_{CE} heeft dan twee waarden maximaal en minimaal.



In geval van *digitale informatieverwerking* wordt een digitale ingangsinformatie verwerkt tot een uitgangsinformatie die eveneens digitaal is.
De verwerkende schakeling moet *een beperkt aantal* insteltoestanden aannemen (meestal twee).

VERGELIJKING VAN DIGITALE- MET ANALOGE VERWERKING

- In analoge systemen verwerken de basisschakelingen informatie in de vorm van elektrische spanning of stroom. Van het analoge signaal kan zowel de waarde van de spanning als van de frequentie continu veranderen tussen bepaalde grenzen. De schakelingen zijn zodanig ontworpen dat de toestandsveranderingen hierin glijdend worden doorlopen.

- In digitale systemen veranderen de spanningen sprongsgewijs van hoog naar laag en omgekeerd. De twee waarden van de informatie liggen voor de meeste schakelingen van het systeem vast op b.v. 0 en 5 V. Veelal wordt gebruik gemaakt van pulsvormige signalen. De schakelingen zijn zodanig ontworpen dat de overgang van de ene naar de andere toestand zo snel mogelijk plaats vindt (sprongsgewijs).

- De tweewaardigheid van het digitale signaal en het feit dat met een paar basisschakelingen zeer ingewikkelde digitale schakelfuncties kunnen worden gerealiseerd, heeft er toe geleid dat er in digitale systemen vele schakelingen van hetzelfde soort voorkomen. Van een paar basisfuncties worden dan ook vele exemplaren in een digitaal systeem toegepast.
  Bij analoge systemen zijn de signalen vaak vrij gecompliceerd. De schakelingen voor de diverse soorten van informatieverwerking kunnen niet uit steeds dezelfde basisschakelingen worden samengesteld. Voor de analoge informatieverwerking zijn een groot aantal basisschakelingen mogelijk, waarvan er in een systeem meestal slechts een beperkt aantal worden toegepast.

OEFENINGEN

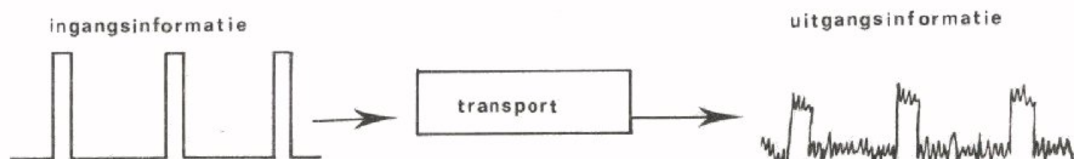
1. Vul in of hier sprake is van een digitaal of een analoog systeem. (Denk aan het verschil in "sprongsgewijze" of "glijdende" verandering).

	Digitaal	Analoog
- Schakeling met cijferindicatorbuis.		
- Versnellingssysteem van een DAF.		
- Versnellingsbak van een "gewone" auto.		
- Drukknopafstemming van een TV-ontvanger.		
- Geluidsterkteregeling van een radio.		
- Versnellingsnaaf van een racefiets.		
- "Stadslicht-dimlicht-groot licht"-schakeling van een auto.		
- Gasregeling van een auto.		

WANNEER ANALOGE-, WANNEER DIGITALE VERWERKING?

Overwegingen bij de keuze van analoge- of digitale verwerking zijn o.a.:

- De *vereiste nauwkeurigheid*. Met digitale verwerking kan een hogere nauwkeurigheid worden bereikt.
- De *kosten*. Informatieverwerking waaraan niet al te hoge eisen worden gesteld is meestal simpeler analoog op te lossen dan digitaal, en daarom goedkoper.
  Is de vereiste nauwkeurigheid echter zeer groot, dan moet een digitale uitvoering gekozen worden ook al zou analoge verwerking goedkoper zijn.
- De *vorm* van in- en uitgangsinformatie.
  Wordt digitale informatie aangeboden en moet er ook digitale informatie aan de uitgang komen, dan kiest men meestal voor digitale verwerking. Immers, twee extra omzettingen worden dan vermeden (voorbeeld: rekenmachine).
  Wordt analoge informatie aangeboden en moet ook analoge informatie afgegeven worden, dan ligt analoog verwerken voor de hand. Voorbeelden hiervan zijn geluidversterkers.
- *Informatietransport*.
  Moet de informatie over grote afstand getransporteerd worden met behoud van hoge betrouwbaarheid en nauwkeurigheid, dan zal men zeker voor digitale verwerking kiezen.
  We lichten dit toe.



Als een signaal over grote afstand getransporteerd wordt, treedt er verzwakking op waardoor het signaal kleiner wordt. Bovendien komen er gemakkelijk storingen bij.

Bij analoge informatie leidt dit al snel tot een ontoelaatbaar grote vervorming, vooral als de over te brengen informatie klein is.
Wordt informatie in digitale vorm getransporteerd, dan bederven storingen minder gauw het signaal omdat het aantal impulsen herkenbaar blijft; of ze daarbij vervormd zijn is niet van belang.

OEFENINGEN

1. Bij een platenspeler gebruikt men een analoge versterker omdat:

   de ingangsinformatie | **analoog/digitaal** | is,

   de uitgangsinformatie | **analoog/digitaal** | moet zijn.

2. Bij het tellen van een grote magazijnvoorraad balen suiker is de ingangsinformatie digitaal. Men wenst een digitale uitgangsinformatie met grote nauwkeurigheid. Men kiest voor

   | **analoge/digitale** | verwerking.

3. De druk van de olie in een 100 km lange pijpleiding moet om de 10 km nauwkeurig gemeten worden. De meetresultaten wil men aan het begin van de leiding ter beschikking hebben.
   Men kiest dan voor

   | **analoge/digitale** | verwerking van de meetinformatie.

DE BOUWSTENEN VOOR ELEKTRONISCHE INFORMATIE VERWERKING

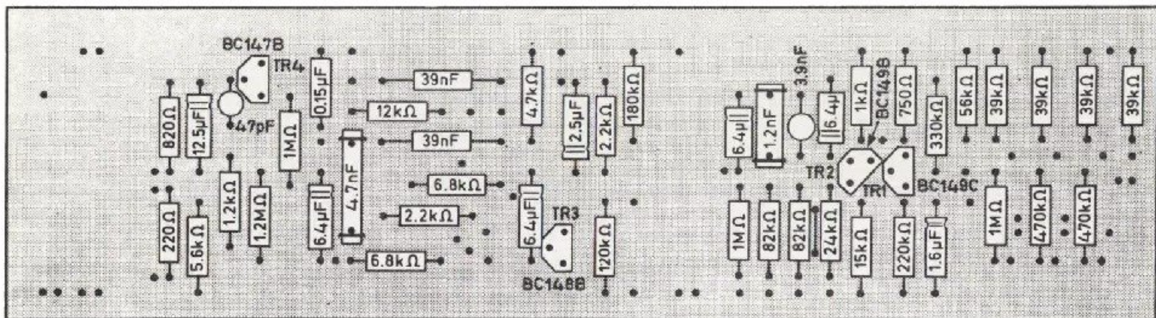
In het B-deel zijn de meeste componenten die men in elektronische schakelingen toepast reeds behandeld. De voornaamste zijn:

- de weerstand, condensator, spoel en transformator.
- de halfgeleiders: diode, transistor, FET, MOST, DIAC, thyristor en TRIAC.
- de buizen: diode, pentode en triode.
- de verbindingen, waaronder de coax-kabel.

Elektronische informatie-verwerkende systemen zijn opgebouwd uit schakelingen, waarin deze componenten worden toegepast.
Naarmate de systemen meer schakelingen gingen bevatten zocht men naar methodes om de schakelingen goedkoper en kleiner van afmetingen te maken.

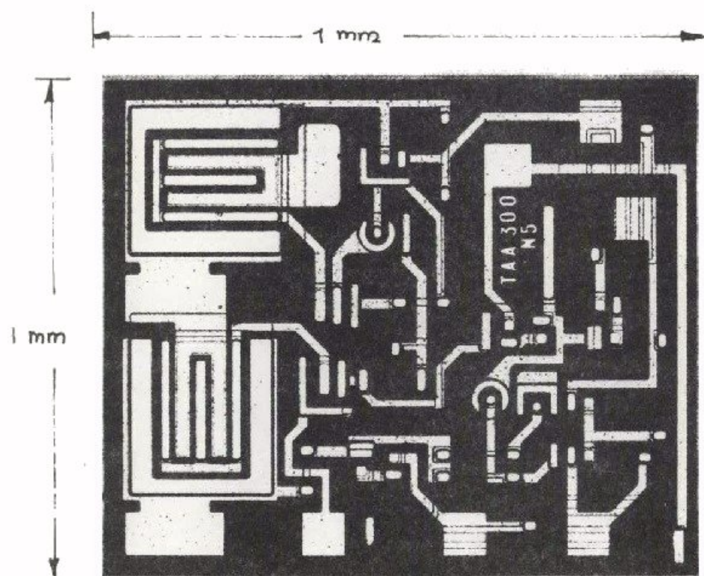
Bij de oude methode gebruikte men een chassis, waarop de onderdelen mechanisch bevestigd werden en stuk voor stuk d.m.v. draden elektrisch met elkaar werden verbonden. De montage kost veel tijd, terwijl er kans op fouten bestaat.

Een belangijke stap vooruit is het gebruik van montageplaten met "gedrukte bedrading". Deze zijn in les B 126 ter sprake gekomen.
Hieronder ziet u nog eens onder- en bovenaanzicht van een "printplaat".

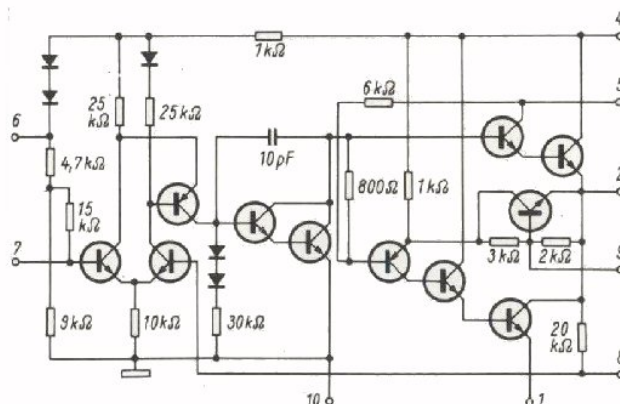


Hoewel bij "gedrukte bedrading" het samenstellen van de schakeling grotendeels machinaal kan gebeuren, moeten de gebruikte componenten (weerstanden, condensators, printplaat, enz.) nog afzonderlijk gefabriceerd worden. Bovendien zijn afmetingen wel kleiner dan bij chassismontage, maar vaak nog niet klein genoeg.

Ontwikkelingen in de fabricage van halfgeleidercomponenten hebben geleid tot het maken van complete schakelingen of "circuits" op één klein plakje silicium. Dit heeft bijvoorbeeld een oppervlak van 1 mm^2. Het zijn de zogenaamde *geintegreerde schakelingen*, in het engels aangeduid met "Integrated Circuits", (uitgesproken "integreetid sukkits"). Ze worden kortweg IC's genoemd. Een zo'n kleine IC kan enkele tientallen componenten bevatten, zoals dioden, transistors, weerstanden en condensators. Hieronder ziet u een voorbeeld.

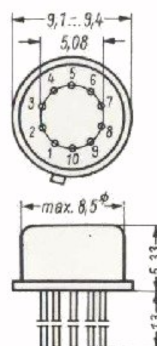


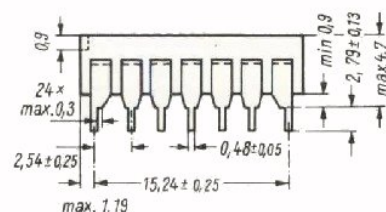
Schema van naaststaande IC

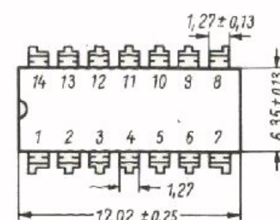


Hiernaast de "behuizing" van IC's:

- Ronde uitvoering van metaal.
- Rechthoekige uitvoering van kunststof.







IC's zijn klein van afmetingen en betrouwbaar. Ze zijn goedkoop als ze in grote hoeveelheden vervaardigd worden.
Het maximale vermogen dat bij de huidige stand van de techniek in een IC in warmte kan worden omgezet, zonder dat de temperatuur ontoelaatbaar hoog wordt, bedraagt ongeveer 0,5 Watt.
De afmetingen van het silicium-plakje zijn dan 5 bij 5 mm.
Componenten zoals spoelen, transformators, grote condensators en weerstanden kunnen niet in IC's worden verwerkt. Ook voor vermogens van meer dan 0,5 Watt is men aangewezen op schakelingen die zijn opgebouwd met afzonderlijke componenten.

In de *digitale techniek* worden veelvuldig IC's toegepast. Men heeft daar namelijk te doen met grote aantallen van eenzelfde schakeling.
De schakeling hoeft in de regel maar kleine signalen te verwerken, terwijl het te dissiperen vermogen in de orde van grootte van μW is.

In de *analoge techniek* vinden IC's veel minder toepassing, hoewel het de laatste tijd toeneemt. Dit komt omdat in deze techniek de verscheidenheid in soorten schakelingen veel groter is dan in de digitale techniek.

SAMENVATTING

- In de techniek verstaat men onder *informatie*: de waarde van een natuurkundige grootheid of de toestand van een component.
- *Analoge informatie* kan tussen een minimum- en een maximum waarde elke waarde aannemen.
- *Digitale informatie* kan slechts een beperkt aantal vaststaande waarden aannemen en geen tussenwaarden.
- Het gebruiken van informatie noemt men informatie *verwerking*. Dit gebeurt vaak met elektronische middelen.
- *Ingangs-informatie* wordt aan de ingang van het verwerkende systeem toegevoerd.
- *Uitgangs-informatie* wordt aan de uitgang van het verwerkende systeem afgegeven.
- *Opnemers* zetten niet-elektronische informatie om in elektronische informatie. Voorbeeld: microfoon.
- *Weergevers* zetten elektronische informatie om in niet-elektronische informatie. Voorbeeld: luidspreker.
- In *analoge systemen* kan de gebruikte schakeling binnen zijn werkgebied elke toestand aannemen.
- In *digitale systemen* kan de gebruikte schakeling een beperkt aantal toestanden aannemen, meestal slechts twee.
- Voordeel van analoge verwerking:

  er zijn vaak minder componenten nodig, waardoor het apparaat goedkoper kan zijn en kleiner van afmetingen.
- Voordeel van digitale verwerking:

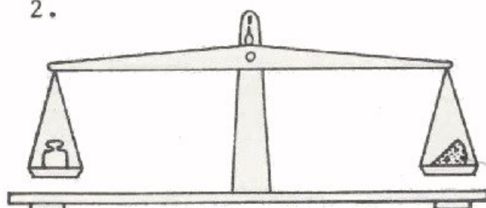
  er kan een grotere nauwkeurigheid en betrouwbaarheid mee worden bereikt.
- De keuze van analoge- of digitale verwerking hangt in hoofdzaak af van:
  - de vereiste nauwkeurigheid.
  - de aard van ingangs- en uitgangsinformatie.
  - de aard van de bewerkingen.
- IC's zijn schakelingen met zeer kleine afmetingen, die in één keer van een plakje silicium zijn gemaakt.
- Grote componenten en schakelingen waarin een vermogen van meer dan 0,5 W moet worden gedissipeerd, kunnen niet in IC's worden ondergebracht.

- IC's past men zéér veel toe in de digitale techniek omdat:
  - in deze techniek weinig *soorten* schakelingen voorkomen.
  - elke voorkomende schakeling in zeer grote aantallen wordt toegepast, zelfs in één apparaat.
  - de schakelingen een zeer gering vermogen dissiperen.
- IC's past men in de analoge techniek veel minder toe, omdat:
  - in deze techniek zeer veel *soorten* schakelingen voorkomen.
  - in deze techniek vaak grote componenten toegepast moeten worden, zoals spoelen en trafo's, die niet in IC's onder te brengen zijn.
  - in deze techniek schakelingen worden toegepast waarin een vermogen groter dan 0,5 Watt moet worden gedissipeerd.

NAAM: [ ] KLAS: [ ]

1. Een oscilloscoop verwerkt zijn ingangsinformatie

analoog/digitaal

2. 

Het gewicht van een stuk kaas wordt bepaald met behulp van deze weegschaal en een stel gewichten.
Het gewicht wordt

analoog/digitaal bepaald.

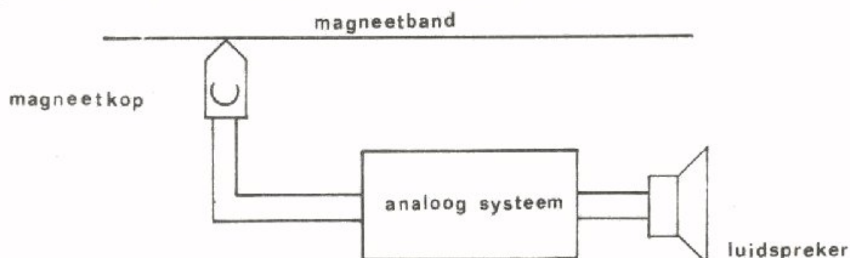
3. Een loodgieter meet de lengte van een asje met behulp van een meter en steekpasser.

Hij meet analoog/digitaal

4. Een bankwerker meet de diameter van een boor met een mal, waarin een aantal gaten van uiteenlopende diameter zijn aangebracht.

Hij meet analoog/digitaal

5. Dit is het blokschema van een bandrecorder.



De ingangsinformatie is analoog/digitaal

De opnemer is een [ ]

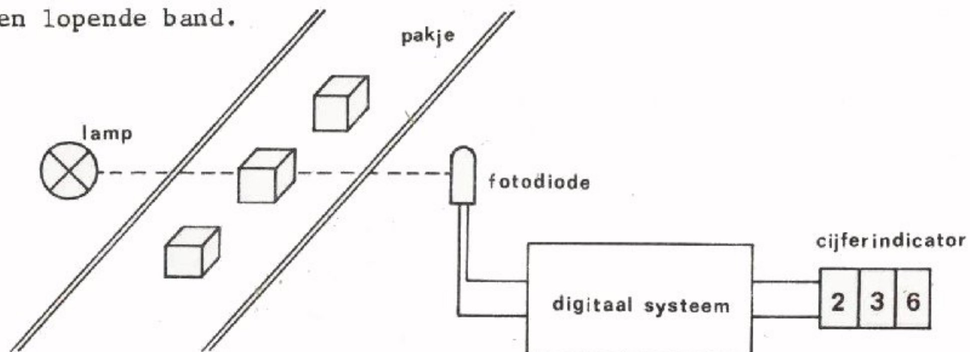
De uitgangsinformatie is analoog/digitaal

De weergever is een [ ]

De informatie wordt analoog verwerkt, omdat:

[ ]

6. Dit is het blokschema van een schakeling voor het tellen van pakjes op een lopende band.



De ingangsinformatie is **analoog/digitaal**

De opnemer is

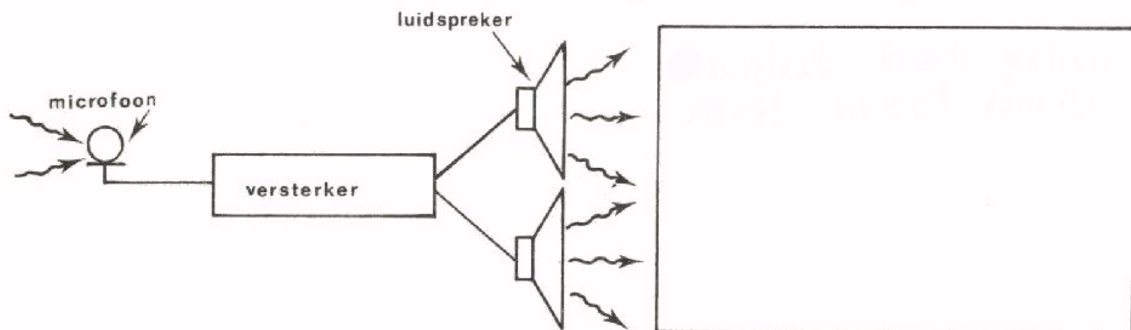
De uitgangsinformatie is **analoog/digitaal**

De weergever is een

De reden dat hier een digitaal systeem wordt gebruikt is:

7. Een zanger zingt voor een microfoon. Het geluid wordt in een schouwburgzaal door luidsprekers weergegeven.

- Men verwerkt de informatie in dit geval elektronisch, omdat



- Tijdens de informatieverwerking vinden volgende omzettingen plaats:

van "geluid" naar

van naar

- De opnemer is

- De weergever is

C 2

DE DUBBELSTRAALOSCILLOSCOOP

INLEIDING

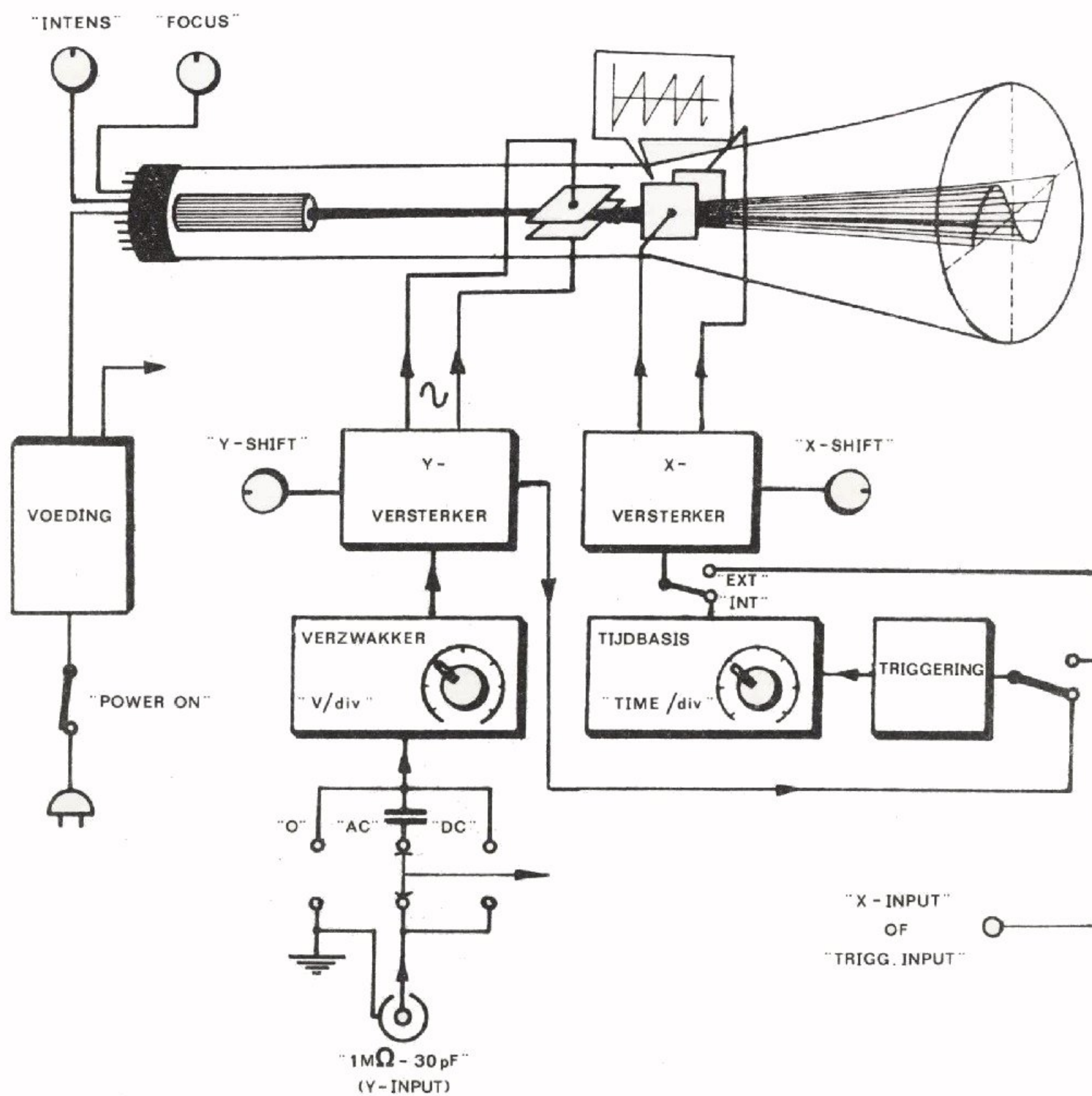
Bij de oscilloscoop die we tot nu toe gebruikten,konden we het beeld van slechts één elektrische spanning tegen de tijd bekijken. In deze oscilloscoop treft maar één elektronenstraal het scherm van de buis; het is een zogenaamde *enkelstraaloscilloscoop*.

Men kan met zo'n enkelstraaloscilloscoop wel twee elektrische spanningen vergelijken voor wat betreft de fase, de amplitude en de frequentie. Het ene signaal voert men aan de X-ingang; het andere aan de Y-ingang. Zoals we herhaaldelijk hebben gezien, ontstaat in het geval van twee sinusvormige spanningen een figuur van Lissajous. We hebben ervaren dat het vaak moeilijk is om deze Lissajous-figuren goed te begrijpen. Worden twee niet-sinusvormige signalen bekeken door de één aan de X-ingang en de ander aan de Y-ingang toe te voeren, dan is de figuur op het scherm nóg veel moeilijker te begrijpen.

Om het wat gemakkelijker te maken heeft men oscilloscopen ontwikkeld met beeldbuizen die twee elektronenstralen bevatten. De ene straal reageert op één elektrisch signaal en de tweede straal op een ander signaal. Op het scherm ziet men dan de afzonderlijke beelden van beide signalen tegen de tijd. Een oscilloscoop met twee elektronenstralen maakt zo tegelijkertijd twee elektrische signalen tegen de tijd zichtbaar. Zo'n oscilloscoop noemt men een *dubbelstraaloscilloscoop*.

In deze les gaan we met de dubbelstraaloscilloscoop kennis maken. In vogelvlucht herhalen we op de twee volgende bladzijden eerst de voornaamste dingen van de enkelstraaloscilloscoop.

ENKELSTRAALSCOOP



HET BLOKSCHEMA VAN DE ENKELSTRAALOSCILLOSCOOP

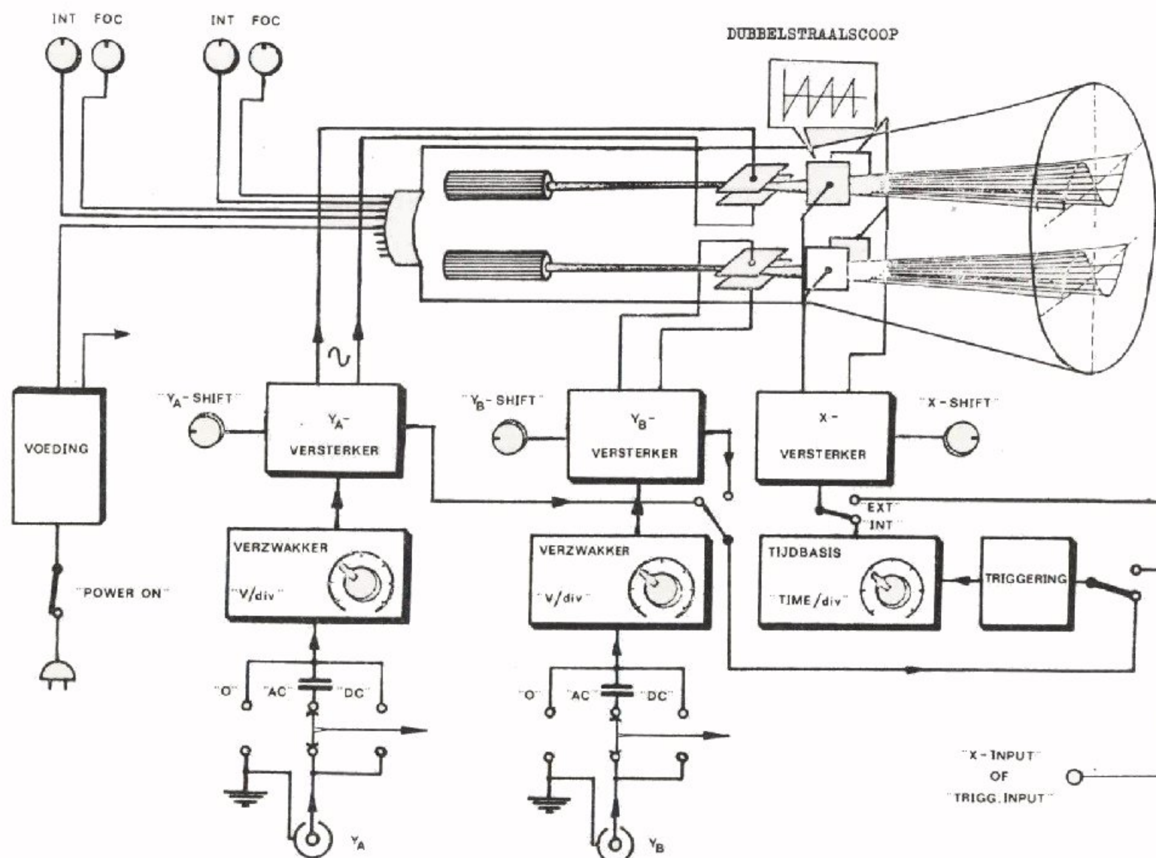
Op het vorige blad ziet u nogmaals het blokschema van een enkelstraaloscilloscoop. De verschillende functies zijn in blokken weergegeven.

- Instelling van het beeld op de buis door middel van
  - "INTENS": regeling van de helderheid.
  - "FOCUS": scherpte van het beeld.
  - "Y-SHIFT": vertikale verschuiving van het beeld.
  - "X-SHIFT: horizontale verschuiving van het beeld.

- Y-versterker voor de Y-deflectie; vertikale afbuiging in "spanning" (V/div).
- X-versterker voor de X-deflectie; horizontale afbuiging in "tijd" (s/div).
- "O-AC-DC": schakelaar aan de ingang van de Y-versterker.
  - Voor het uitfilteren van de gelijkspanningscomponent in de stand AC.
  - Voor gelijk- èn wisselspanningskoppeling aan de versterker in de stand DC.
  - Voor het instellen van de "Y-SHIFT" in de stand O.
- "TRIGGERING": het starten van de lichtstip op "commando" van een inwendig signaal (INTERN), of een van buiten toegevoerd signaal (EXTERN).

HET PRINCIPE VAN DE DUBBELSTRAALOSCILLOSCOOP

Bij een dubbelstraaloscilloscoop zijn, zoals de naam zegt, twee elektronenstralen aanwezig. Er zijn twee elektronenkanonnen in één glazen ballon ondergebracht.
Zie onderstaand het blokschema van dit type oscilloscoop. Er zijn twee stel platen voor afbuiging in vertikale richting. De twee voor de vertikale afbuiging dienende ingangen Y_A en Y_B zijn elk via een eigen verzwakker en versterker met deze platen verbonden. Ze zijn bovendien ieder voorzien van een Y-SHIFT, zodat het mogelijk is het Y_A- beeld en het Y_B-beeld "boven elkaar" te zetten. De platen voor horizontale afbuiging zijn dubbel uitgevoerd, maar worden vanuit één tijdbasis voorzien van dezelfde afbuigspanning.
Het is dus niet mogelijk voor de twee stralen een verschillende tijdbasis te kiezen. De twee elektronenstralen kunnen wel afzonderlijk in helderheid (INT) en scherpte (FOC) geregeld worden.



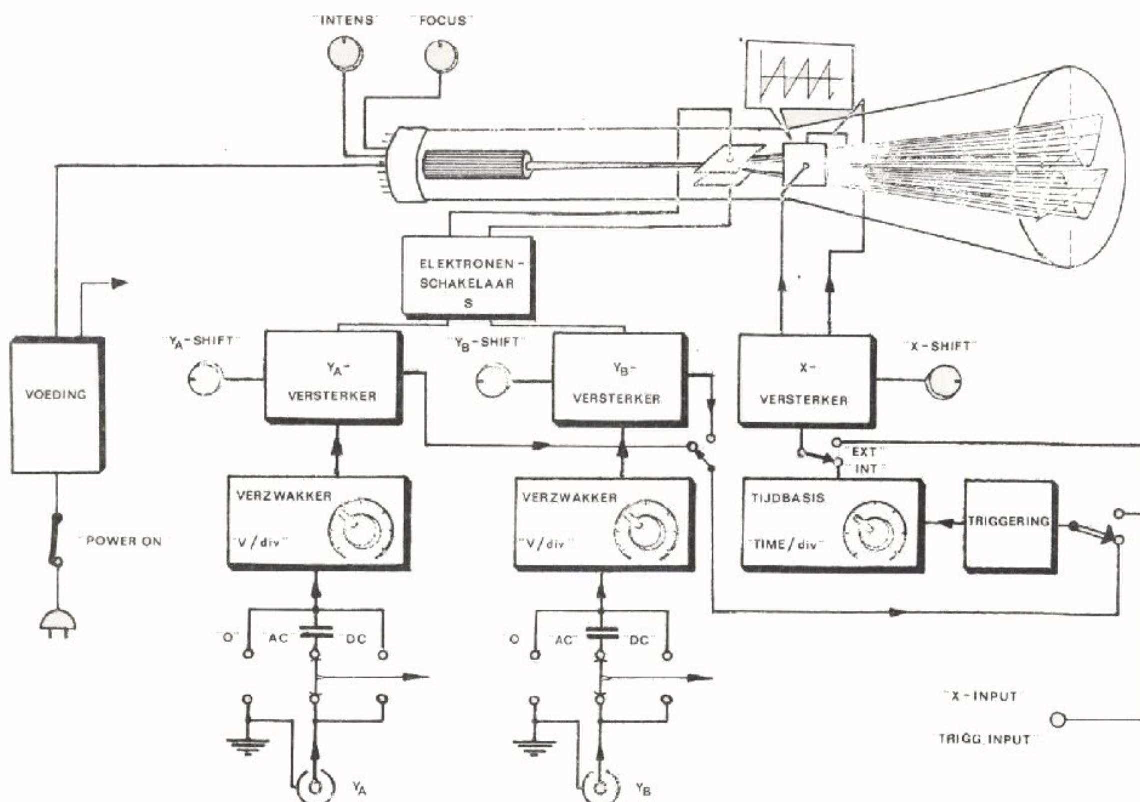
EEN ANDER TYPE: ENKELSTRAALOSCILLOSCOOP MET ELEKTRONENSCHAKELAAR

Men komt ook wel een andere uitvoering van de dubbelstraaloscilloscoop tegen. Deze oscilloscoop lijkt veel op de vorige, maar is eigenlijk geen echte dubbelstraaloscilloscoop. Deze bevat namelijk maar één elektronenkanon en heeft daarom maar één elektronenstraal, zie hieronder.
De oscilloscoop bevat eveneens het vorige type twee Y-versterkers met verzwakkers. Tussen de uitgangen van deze versterkers en de platen voor vertikale afbuiging bevindt zich een zogenaamde *elektronenschakelaar* (zie S in het schema). Dit is een elektronisch uitgevoerde schakelaar die in snel ritme beurtelings het ene of het andere Y-signaal aan de platen voor vertikale afbuiging toevoert. Op het scherm verschijnen beurtelings "stukjes" van het ene en van het andere signaal.
De afzonderlijke Y-versterkers zijn ieder weer voorzien van een Y-SHIFT, zodat het mogelijk is het Y_A-signaal boven het Y_B-signaal te zetten, of omgekeerd.



Het schakelen gebeurt zó vaak per periode, dat de streeplijn praktische als getrokken lijnen te zien zijn.

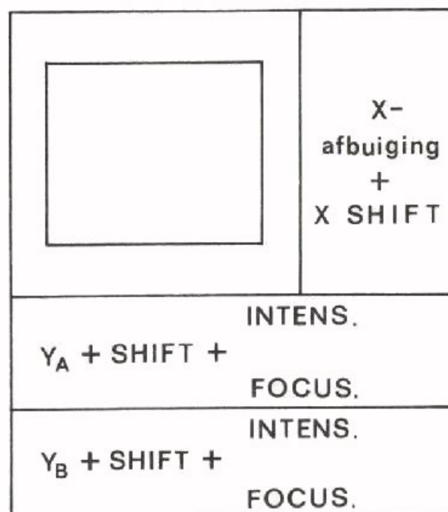
ENKELSTRAALSCOOP MET ELEKTRONENSCHAKELAAR



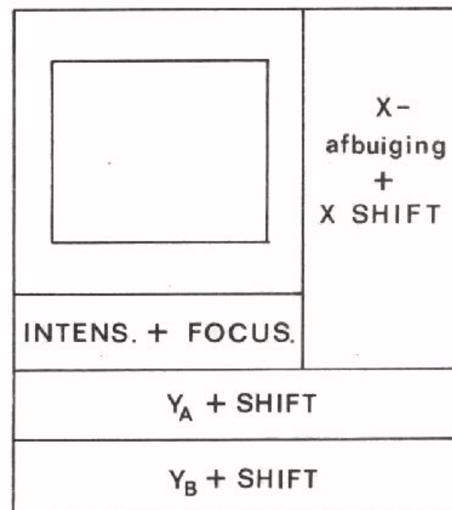
HET HERKENNEN VAN HET TYPE OSCILLOSCOOP

In het voorafgaande hebben we twee soorten oscilloscopen behandeld die twee afzonderlijke signalen tegelijkertijd kunnen laten zien.
Met behulp van wat we nu weten is het vrij eenvoudig aan de buitenkant te ontdekken met welk type we te maken hebben.
In onderstaand figuur is het aanzicht van het bedieningspaneel van twee oscilloscopen gegeven.

DUBBELSTRAAL



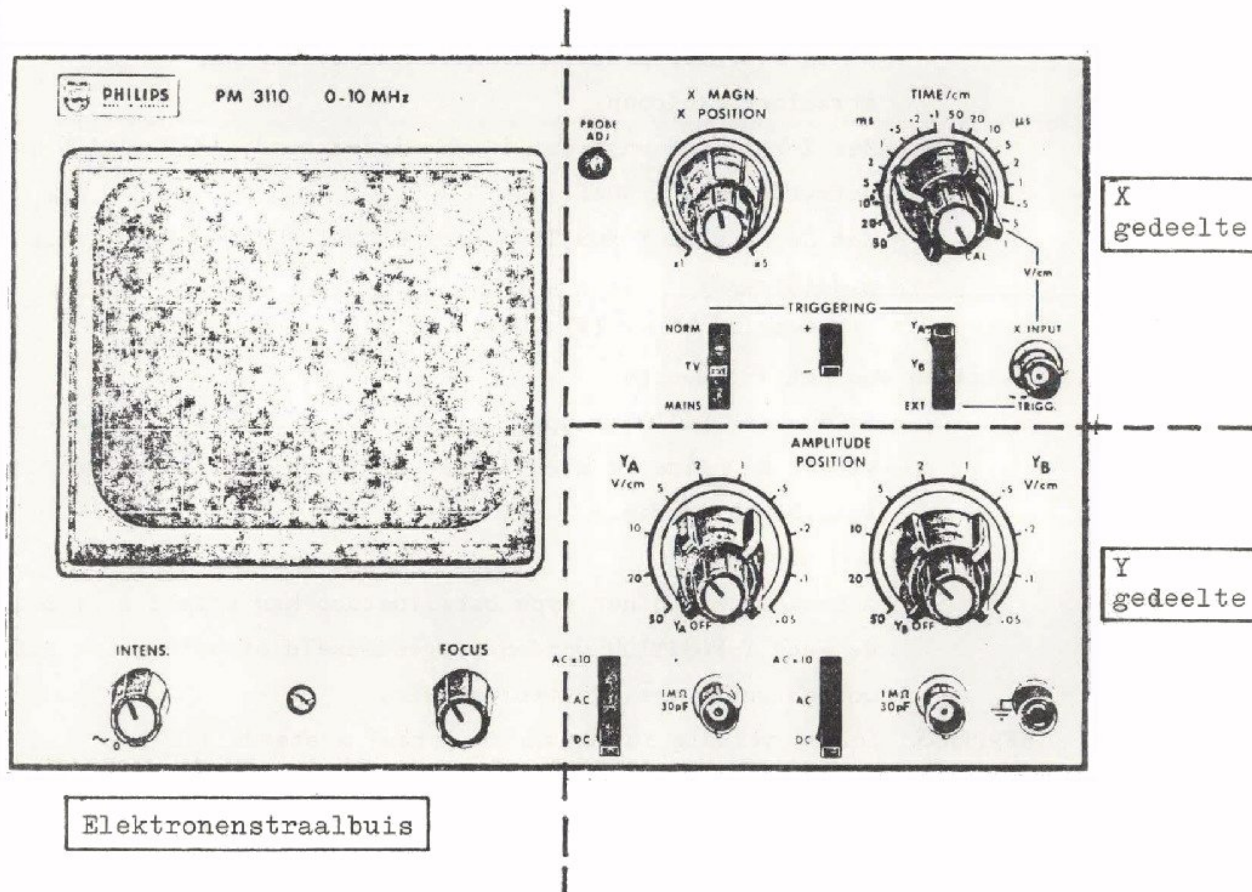
ENKELSTRAAL MET ELEKTRONENSCHAKELAAR



Ga na waaruit het verschil bestaat en verklaar hieronder met enkele woorden waardoor dit wordt veroorzaakt.

VOORBEELDEN VAN EEN OSCILLOSCOOP MET INGEBOUWDE ELEKTRONENSCHAKELAAR

Hier ziet u een afbeelding van de tekstplaat van een oscilloscoop met ingebouwde elektronenschakelaar. Hoewel hij in feite maar één elektronenkanon en dus één elektronenstraal heeft, is ook voor hem de naam "dubbelstraaloscilloscoop" algemeen ingeburgerd. Deze naam heeft hij echter ten onrechte gekregen.



U ziet dat de tekstplaat logisch is ingedeeld; hij spreekt haast voor zichzelf. Duidelijk zijn op de tekstplaat drie gebieden te onderscheiden. Zij hebben te maken met de bediening van de:

- elektronenstraalbuis, (de linkerhelft),
- horizontale- of X-afbuiging, (rechtsboven),
- vertikale- of Y-afbuiging, (rechtsonder).

Ga na of u alle termen op de tekstplaat begrijpt.

OPDRACHT: "BEDIENING VAN EEN DUBBELSTRAALOSCILLOSCOOP"

We gaan nu de oscilloscoop leren bedienen aan de hand van een reeks opdrachten.

Wanneer de tekstplaat van de oscilloscoop welke door u wordt gebruikt nog termen bevat die u niet begrijpt, vraag dan uw leraar om nadere uitleg.

1. Instellen van de elektronenstraalbuis,
   - Netschakelaar aanzetten en controleren of het indicatielampje brandt.
   - Zorg dat u een beeld op het scherm krijgt. Dit gebeurt op precies dezelfde wijze als bij een enkelstraaloscilloscoop.
   - Zet X-POSITION ongeveer in de middenstand. (X-POSITION is hetzelfde als X-SHIFT).
   - Zet de knoppen Y POSITION voor kanaal A en B ongeveer in de middenstand.
   - TIME/cm (of TIME/DIV) tussen 50 ms en 5 ms.
2. Instellen van het Y-gedeelte.
   - Met de Y-POSITION knoppen bij de V/cm (AMPL/DIV) schakelaars, kunnen de beide stralen afzonderlijk in vertikale richting verschoven worden.

     Doe dit eens.
   - Afhankelijk van het type oscilloscoop kan straal A of B m.b.v de knop Y-POSITION worden uitgeschakeld of buiten het scherm worden geplaatst. Controleer dit.

AFSPRAAK: In het vervolg zullen we de straal A steeds 1 à 2 cm boven het midden van het scherm instellen en de straal B 1 à 2 cm onder dit midden.

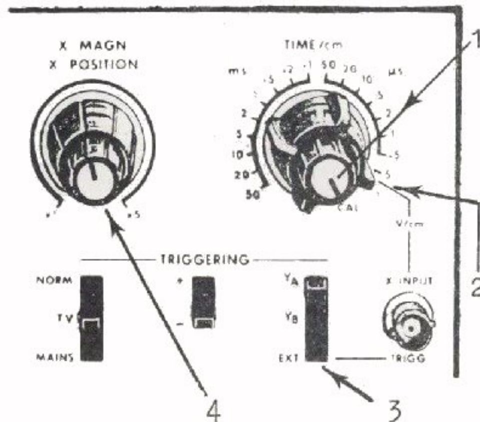
   - De schakelaars Y_A en Y_B dienen om de gevoeligheid in te stellen. Zij bezitten een aantal standen in V/cm of AMPL/DIV.
   - Bij de ingangsbussen bevinden zich de schakelaars "AC x 10 - AC - DC". Bij andere typen oscilloscoop wijken deze schakelaars hiervan af.

     De betekenis van deze schakelaars is u waarschijnlijk zonder meer duidelijk. Wanneer er geen stand "0" bij de ingangsschakelaars aanwezig is moet men, om de lijn op nul in te kunnen stellen, geen signaal aan de ingang toevoeren.

     Bij sommige typen oscilloscopen is er een stand "AC x 10" op de ingangsschakelaars aanwezig. In deze stand is de Y-versterking 10x groter. De aflezing van de gevoeligheid voor kanaal A of B moet dan met 10 worden vermenigvuldigd.

3. Instellen van het X-gedeelte.

In vergelijking met de u bekende enkelstraaloscilloscoop zijn hier slechts kleine verschillen.



1. Continu-regelaar voor de looptijd.
   Hiermede is het mogelijk een tijd te kiezen tussen de stappen van de TIME/cm schakelaar in. Alléén in de meest rechtse stand CAL (calibratie = ijking) gelden de aangegeven waarden van de stappenschakelaar.

2. X-afbuiging met een *externe* spanning. De gevoeligheid is naar keuze:
   1 V/cm Of 5 V/cm.

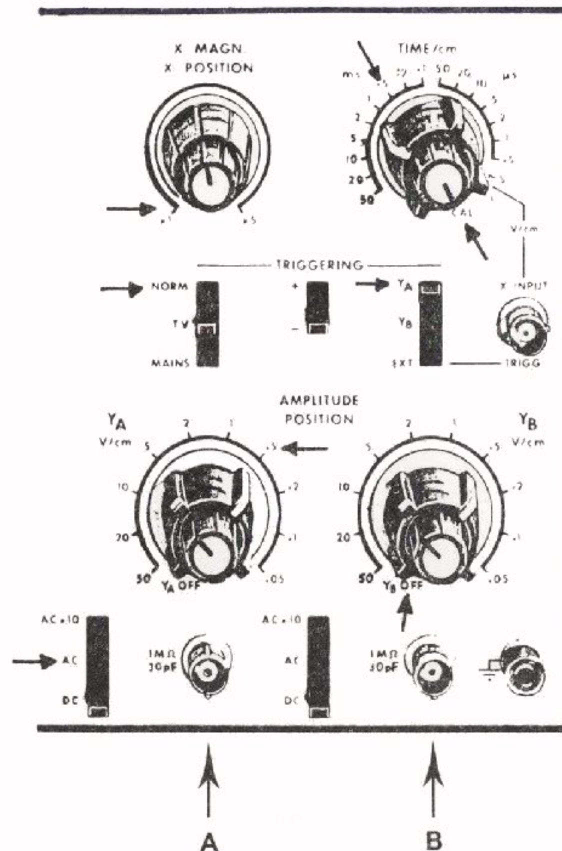
OPMERKING

De TIME/cm continu-regelaar en stappenschakelaar van 50 ms en 5 µs bedienen dus de van binnen uit (INTERN) komende zaagtandspanning voor horizontale afbuiging.

De TIME/cm stappenschakelaar in zijn twee meest rechtse standen bedient een van buiten (EXTERN) toegevoerde spanning voor horizontale afbuiging.

3. Driekeuzeschakelaar om de beelden "stil te zetten" (= TRIGGERING) met behulp van:
   het signaal van Y_A,
   of het signaal van Y_B,
   of een extern signaal.

4. X MAGN. en X POSITION.
   Magn. is een afkorting van het engelse woord magnifier (spreek uit meknifaier) = vergroter. Hiermede kan de X-afbuiging of tijdbasis tot 5x worden "uitgerekt".
   Voor normaal gebruik op "1x" zetten.
   POSITION heeft hier dezelfde betekenis als bij de Y-kanalen. De plaats in horizontale richting wordt hiermede bepaald (X SHIFT).



- Zet de schakelaars en knoppen van de oscilloscoop in de met pijlen aangegeven standen.
- Sluit een sinusvormige spanning van 1 kHz aan op ingang A.
- Stel het beeld met de knop Y_A POSITION in op het midden van het scherm.
- Regel de generatorspanning tot een top tot topwaarde van 6 cm.
- Plaats het beeld in het midden van het scherm door middel van X POSITION.

● De tijdsduur van één periode van deze spanning is: [cm] = [ms]

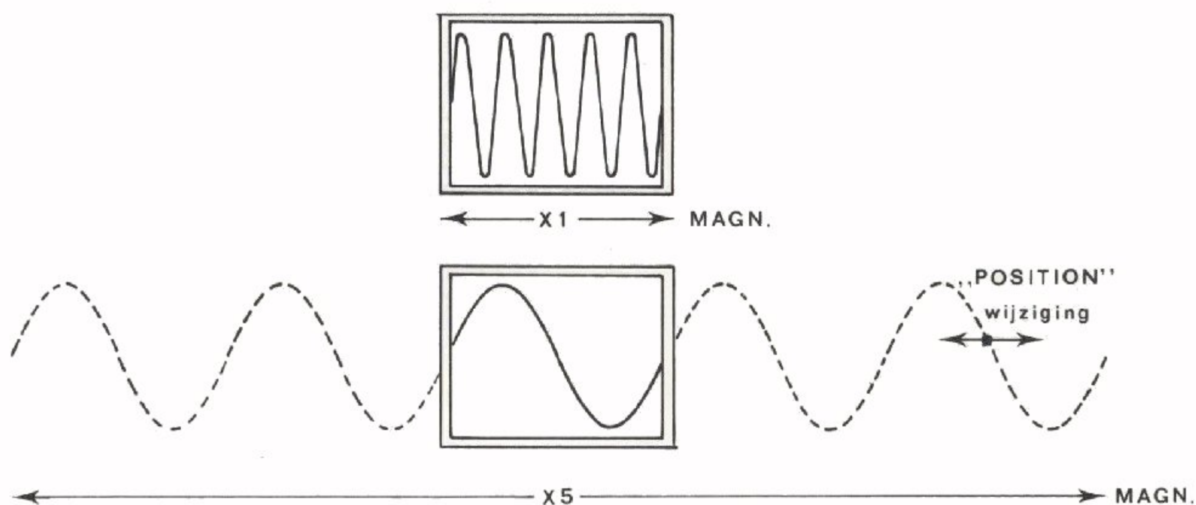
● Plaats de knop "X MAGN" geheel rechtsom in de stand "x5".
Nu is de tijd voor het schrijven van 10 cm: [ms]

Per cm afbuiging is nu de tijd: [ms]

CONCLUSIE

In de stand "x5" van "X MAGN" moet de waarde van de stand TIME/cm vermenigvuldigd worden met [ ]

Draai nu de knop X POSITION langzaam van geheel linksom naar geheel rechtsom en kijk op het scherm wat er gebeurt.
U ziet nu alle vijf de sinus-perioden die eerst samen op het scherm stonden, als het ware één voor één "de revue passeren".
Anders gezegd: men kan door middel van X POSITION de gehele sinustrein van vijf perioden van plaats tot plaats "vergroot" bekijken. Dit lijkt op het met een loupe bekijken van één periode alleen, terwijl toch alle vijf de perioden aanwezig zijn. Deze "loupe" heeft dan de afmetingen van het gehele oscilloscoopscherm. De niet-zichtbare perioden vallen buiten het scherm. In onderstaand plaatje is dit weergegeven.



OPDRACHT: HET METEN VAN TWEE SPANNINGEN

- Zet de AC-DC-schakelaars elk in de stand AC.
- Zet de schakelaar bij TRIGG in de stand Y_A.
- Zet "TIME/cm" op 1 ms.
- Zet "Y_A" en "Y_B" elk op 1 V/cm.
- Sluit op ingangen Y_A en Y_B eenzelfde sinusvormige generatorspanning aan. Regel de frequentie zodanig dat er enkele perioden op het scherm verschijnen. Stel de uitgangsspanning van de generator zó in, dat op het scherm een beeld van totaal 1 cm hoog ontstaat.
- Zet de ingangsschakelaar "Y_B" nu in de stand AC x 10. Hoeveel maal zo groot is het beeld van Y_B nu als dat van Y_A?

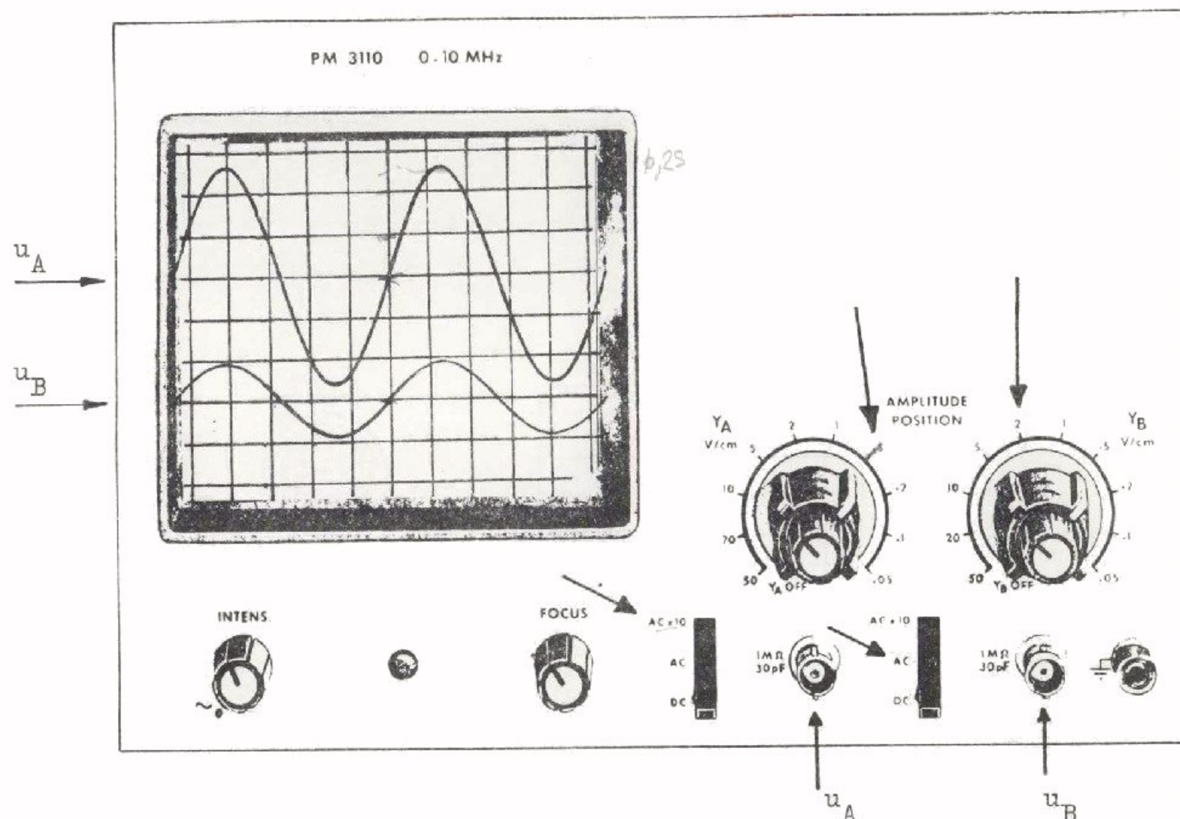
- In welke stand van de schakelaar Y_B *amplitude* is de beeldhoogte van Y_B weer 1 cm?

CONCLUSIE

In de stand AC x 10 wordt de gevoeligheid inderdaad 10x zo groot.

OEFENING

In volgende figuur zijn de standen van de verschillende schakelaars met pijlen aangegeven.
Aan de ingangsbussen worden de spanningen u_A en u_B toegevoerd.



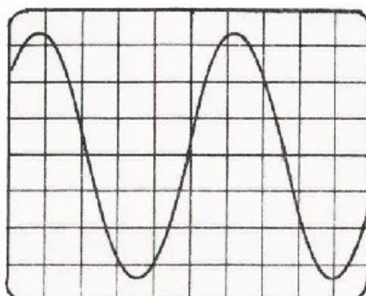
Uit de beelden op het scherm blijkt nu:

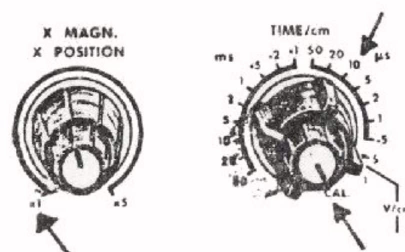
$U_{A(t)}$ = 0,13 V DC

$U_{B(t)}$ = 1,8 V AC

OEFENINGEN

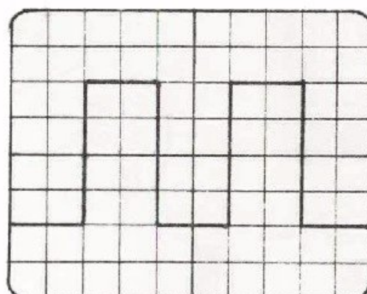
1.

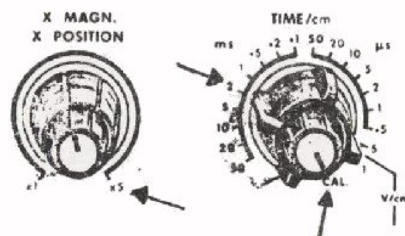




In de aangegeven standen van de knoppen is de frequentie:

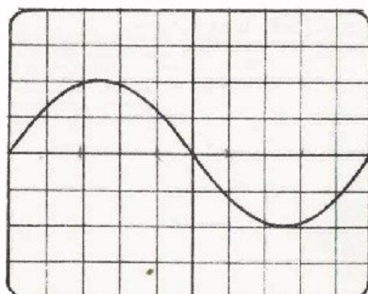
2.

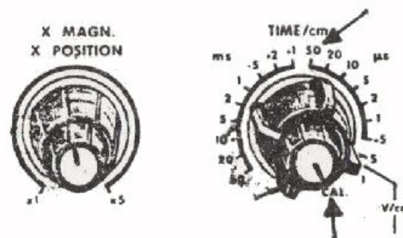




In de aangegeven standen van de knoppen is de frequentie:

3.





Bij een frequentie van 10.000 Hz is de stand van X MAGN:

x

OPDRACHT: HET METEN VAN TWEE GELIJKE SPANNINGEN

Deze meting geeft u de gelegenheid meer ervaring op te doen in het bedienen van de "dubbelstraaloscilloscoop".

- Sluit op de ingangen A en B hetzelfde signaal aan: U_t = 10 V bij f = 1 kHz. Zet de amplitudeschakelaars in de stand 5 V/cm.
- Zet de beelden van beide signalen eerst op elkaar en plaats daarna het signaal A 1 cm boven het midden en signaal B 1 cm onder het midden.
- Trigger de tijdbasis eerst op signaal A en daarna op signaal B. Waarom maakt dit geen verschil?

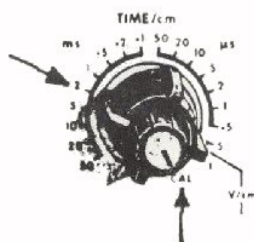
- Verwijder nu signaal A. Maakt het nu wel verschil of we op signaal A of signaal B triggeren?

ja/neen

Hoe komt dit dan?

- Als men een signaal B met bekende frequentie wil vergelijken met een signaal A met onbekende frequentie, dan moet men de tijdbasis triggeren op het signaal:

- Zet de "TIME/cm"-knop in onderstaande stand.

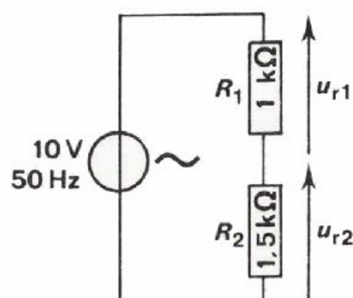


Bepaal bij welke frequentie er één periode op het scherm komt.

Voor "X MAGN. x 1" f =

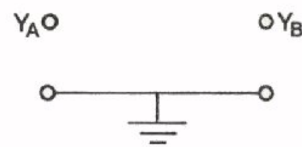
Voor "X MAGN; x 5" f =

OPDRACHT: HET METEN VAN TWEE VERSCHILLENDE SPANNINGEN



Stel dat men uit nevenstaande schakeling twee spanningen wil vergelijken met een enkelstraaloscilloscoop.
De Y-ingang wordt dan voor het ene signaal en de X-ingang voor het andere gebruikt.
De spanningen moeten dan met elkaar worden vergeleken door middel van een Lissajous-figuur. Hun verloop in de tijd is dan niet op het scherm te zien.

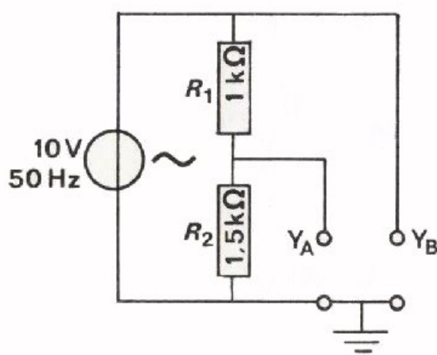
- Bouw deze schakeling op het paneel.
  Gebruik voor de volgende drie proeven een soldeertrafo als wisselspanningsbron.
  Als men de twee spanningen u_{r1} en u_{r2} met een dubbelstraaloscilloscoop wil vergelijken, moet men rekening houden met de opbouw van de oscilloscoop. De beide ingangen A en B hebben nl. een gemeenschappelijke aarde.



De spanningen over R_1 en R_2 kan men op drie verschillende manieren bepalen.

- Zet de schakelaar "TRIGG." in de stand "MAINS". (of "UNE").
  Nu komt triggering met behulp van de netspanning tot stand.

● Eerste manier.



- Meet de top tot topwaarde van u_{r2}:

$U_{(r2)tt}$ = [ ]

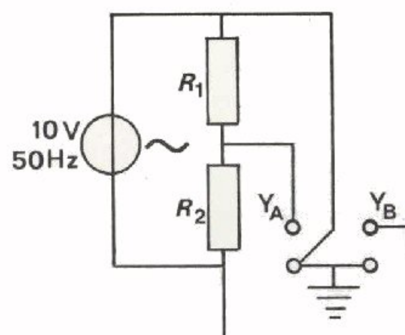
- Meet de top tot topwaarde van $u_{r1} + u_{r2}$ =

$U_{(r1 + r2)tt}$ = [ ]

- Hieruit volgt:

$U_{(r1)tt}$ = [ ]

● Tweede manier.



- Meet:

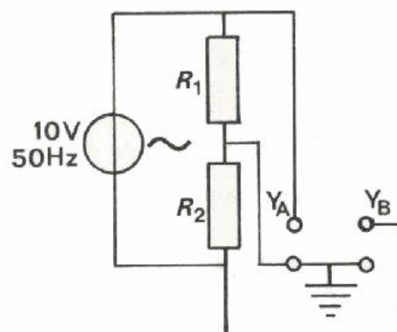
$U_{(r1)tt}$ =

en $U_{(r1 + r2)tt}$ =

- Bereken:

$U_{(r2)tt}$ =

● Derde manier.



- Meet op nevenstaande manier

$U_{(r1)tt}$ =

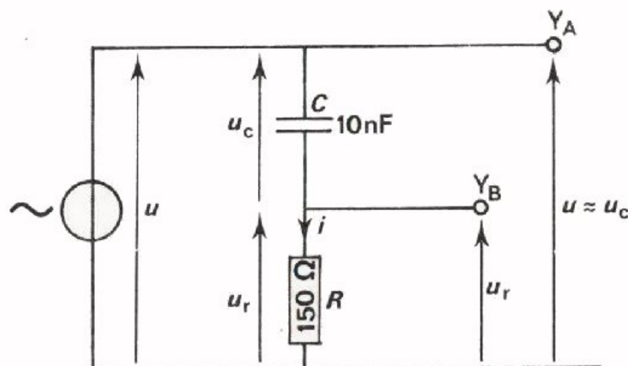
$U_{(r2)tt}$ =

Waarom bestaat er faseverschil tussen deze beide spanningen en hoeveel bedraagt die?

OPDRACHT: HET METEN VAN HET FASEVERSCHIL TUSSEN TWEE SPANNINGEN

Zoals bekend ijlt de stroom door een ideale condensator 90^0 vóór op de spanning over die condensator.

- Bouw deze schakeling.



De serieweerstand *R* is klein t.o.v. de impedantie van de condensator. Hierdoor is de spanning over de *C* praktisch gelijk aan de totale spanning u. Verder is de spanning over de *R* een maat voor de stroom door de serieschakeling en dus voor de stroom door de condensator.

- Stel de generator in op 13 kHz. Voer het signaal toe aan de schakeling vanuit de laagohmige uitgang.
  Maak $u \approx u_c$ en u_r op het scherm van de oscilloscoop zichtbaar.
  Bepaal het faseverschil tussen u_c en u_r.

φ = [ ]

FREQUENTIEMETING

Met een enkelstraaloscilloscoop kan men frequentiemetingen doen. Men sluit dan een spanning met een bekende frequentie aan op de X-ingang en die met de onbekende frequentie op de Y-ingang. Hebben de frequenties een "mooie" verhouding, dan ontstaat op het scherm een zogenaamde *figuur van Lissajous*. De verhouding van het aantal toppen in de Y-richting tot het aantal in de X-richting is dan gelijk aan de frequentieverhouding.

Ook met de "dubbelstraaloscilloscoop" kunnen we een frequentie meten met behulp van Lissajousfiguren. Hiertoe kan men dan de spanning met bekende frequentie extern toevoeren aan de "X-input", daarbij de TIME/cm - stappenschakelaar in één van zijn twee uiterste rechtse standen zettend; De spanning met onbekende frequentie moet aan de A - óf aan de B -ingang worden toegevoerd.

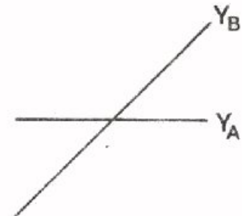
Met de "dubbelstraaloscilloscoop" kunnen we echter ook anders te werk gaan. Zorg voor interne horizontale afbuiging; voer de spanning met bekende frequentie bijvoorbeeld aan de Y_A-ingang toe. Voer dan de spanning met onbekende frequentie aan de andere ingang toe.
In geval van een "mooie" frequentieverhouding kan men dan twee stilstaande beelden verkrijgen, waarbij de frequentieverhouding gelijk is aan de verhouding van het aantal perioden over eenzelfde breedte.

In een volgende opdracht gaan we de frequentiebepaling beoefenen op beide manieren.

OPDRACHT: FREQUENTIEMETING

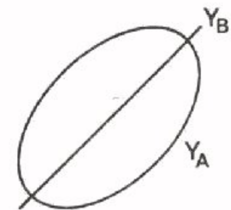
- Voer een "standaard-wisselspanning" van circa 2 V bij 10 kHz toe vanuit b.v. de PM 5100 aan de Y_B-ingang én aan de "X-input". Zet de TIME/cm-stappenschakelaar in zijn meest rechtse stand (gevoeligheid 1 V/cm).

  U ziet nu dat de Y_B-spanning en de(zelfde) X-spanning als figuur van Lissajous een schuine rechte lijn geven. Omdat aan de Y_A-input géén spanning wordt toegevoerd, geeft deze een horizontale rechte lijn.



- Voer bovendien vanuit een andere generator (b.v. de PM 5160) een sinusvormige spanning van 10 kHz toe aan de Y_A-ingang.

  Als de frequenties van de beide spanningen gelijk zijn, ziet u behalve de schuine lijn van het Y_B-signaal ook een stilstaande ellips van het Y_A-signaal. Zorg ervoor dat de hoogte van het Y_B- en het Y_A-signaal op het scherm even groot is.



- Op het scherm staan nu *twee* Lissajous-figuren: één van Y_A, één van Y_B.

- Zet de TIME/cm-stappenschakelaar in de stand 20 µs. Nu ziet u een stilstaand Y_B-signaal (te controleren door even aan de Y_B SHIFT te draaien) en een "lopend" Y_A-signaal. De frequenties zijn ongeveer gelijk.

- Zet de TIME/cm-stappenschakelaar weer in zijn uiterst rechtse stand (1 V/cm). Breng de frequentie van het PM 5160-signaal ongeveer op 20 kHz, zodat als figuur van Lissajous een "liggende 8" zichtbaar wordt. Dan is $f_A = 2 f_B$.

- Zet TIME/cm weer in de 20 µs stand. U ziet nu de stilstaande Y_B-sinus en de "lopende" Y_A-sinus met 2x zoveel perioden.

- Herhaal de gedane metingen nog eens voor een aantal andere "mooie" frequentieverhoudingen.

OPMERKING

Voor twee sinusvormige spanningen is de frequentiemeting met Lissajous-figuren de handigste.
Is echter één van de signalen (of zijn beide signalen) niet-sinusvormig, dan is de laatste methode eigenlijk de enig bruikbare.

- Herhaal de gedane metingen, waarbij de PM 5160 in plaats van een sinusvormige nu een blokspanning toevoert. U zult ervaren dat de Lissajous-methode dan praktisch onbruikbaar.is.

SAMENVATTING

- Naast de *enkelstraaloscilloscoop* heeft men ook de *enkelstraaloscilloscoop met ingebouwde elektronenschakelaar* en de *dubbelstraaloscilloscoop*. Beide laatstgenoemde types duidt men in de praktijk aan met de naam "dubbelstraaloscilloscoop".

- Een "echte" dubbelstraaloscilloscoop is van een enkelstraaloscilloscoop met elektronenschakelaar te onderscheiden door:
  - De "echte" heeft afzonderlijke regelingen van *intensiteit* en *focussering* voor Y_A- en Y_B-signaal.
  - De oscilloscoop met elektronenschakelaar heeft slechts één regeling voor *intensiteit* en *focussering*.

- Een dubbelstraaloscilloscoop geeft tegelijkertijd *twee* spanningen tegen de tijd weer. Hij heeft dan ook *twee* Y-ingangen: de A- en de B-ingang.

- Gewoonlijk is de horizontale afbuiging (in X-richting) voor het A_A en B_B-signaal gemeenschappelijk. Deze kan zowel *intern* (door middel van een zaagtandspanning) als *extern* verzorgd worden.
  Verder kunnen de beelden in verticale richting ten opzichte van elkaar verschoven worden (Y-SHIFT voor het A- en B-signaal

- De *triggering* is te verzorgen met:

  - het Y_A-signaal } *intern*
  - het Y_B-signaal }
  - een van buiten toegevoerd signaal: *extern*

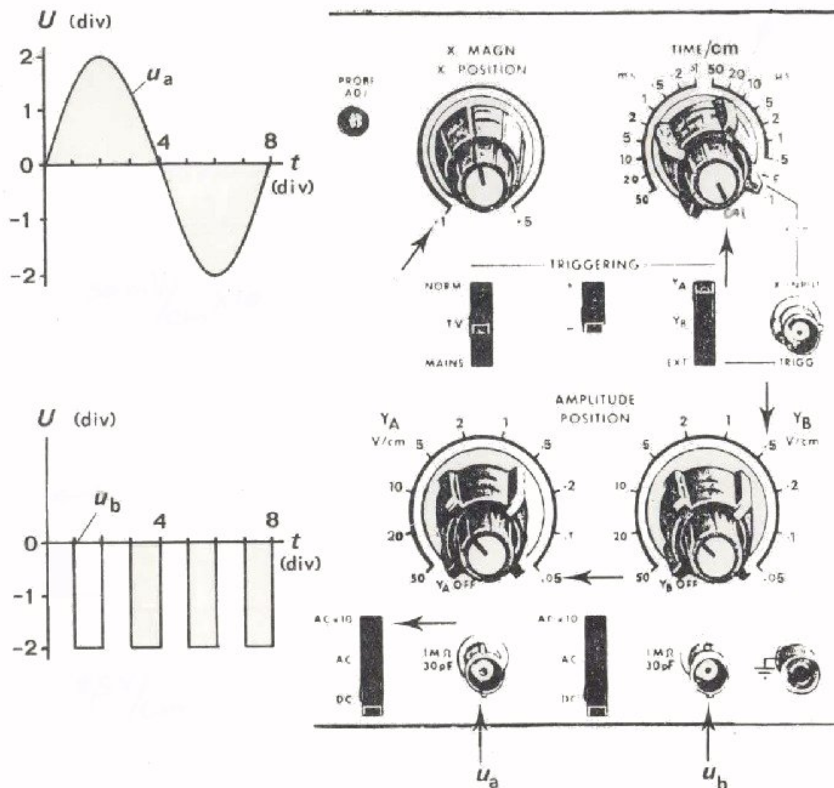
- Een dubbelstraaloscilloscoop is o.a. te gebruiken:
  - als enkelstraaloscilloscoop door alleen óf de Y_A-, óf de Y_B-ingang te gebruiken.
  - Als dubbelstraaloscilloscoop om twee signalen onderling te vergelijken; dit is vooral bij niet-sinusvormige signalen van groot belang. Bedenk bij het gebruik wel dat de Y_A- en de Y_B-ingang een *gemeenschappelijke aarde* hebben.

- Er zijn enkelstraal- zowel als dubbelstraaloscilloscopen met een *x magnifier* (= X-vergroter). Deze biedt de mogelijkheid om een signaal in horizontale richting "uit te rekken". Daardoor kan men dan veel nauwkeuriger een deel van het signaal bekijken.

NAAM: KLAS:

OEFENINGEN

Links zijn de spanningen u_a en u_b op het scherm van de dubbelstraaloscilloscoop getekend. Ernaast zijn met pijlen de standen van de knoppen op de tekstplaat aangegeven. Bepaal de hieronder gevraagde grootheden.



$U_{a(tt)}$ = V

$U_{b(tt)}$ = V

$U_{b(GEM)}$ = V

f_a =

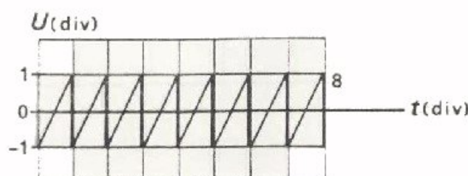
f_b =

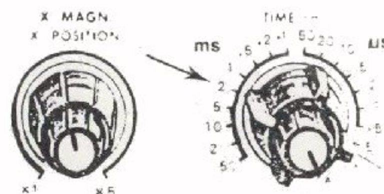
---

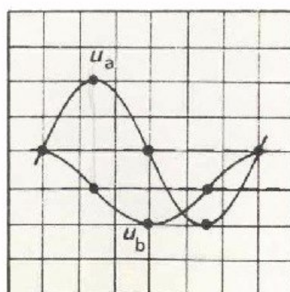
2. De TIME/cm schakelaar staat in de met een pijl aangegeven stand. Bepaal van de zaagtandspanning op het scherm van de oscilloscoop de frequentie indien de knop X MAGN staat:

in de stand "x1"

in de stand "x5"

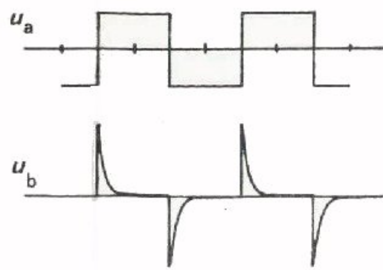


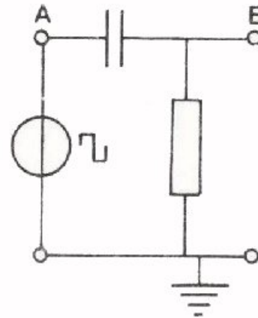




De spanning ijlt ^{0} na op

4.





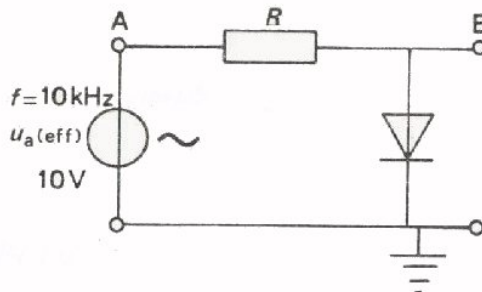
Bij deze schermbeelden is:

RC [>>] T

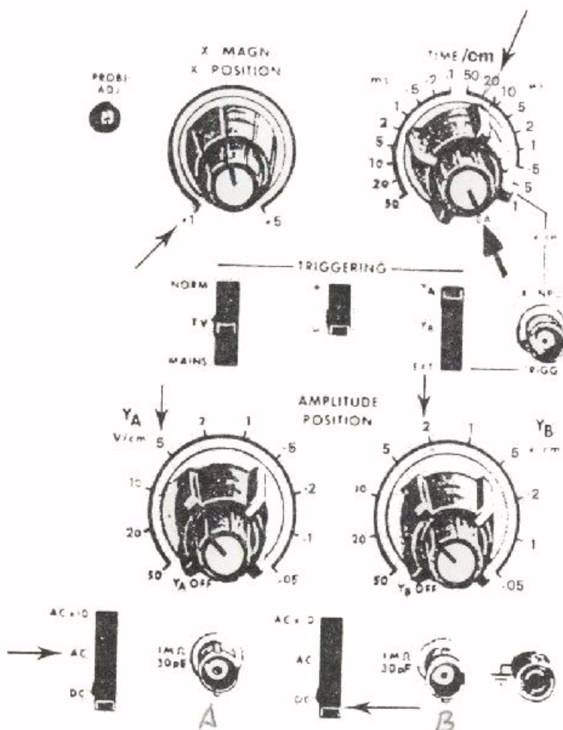
of

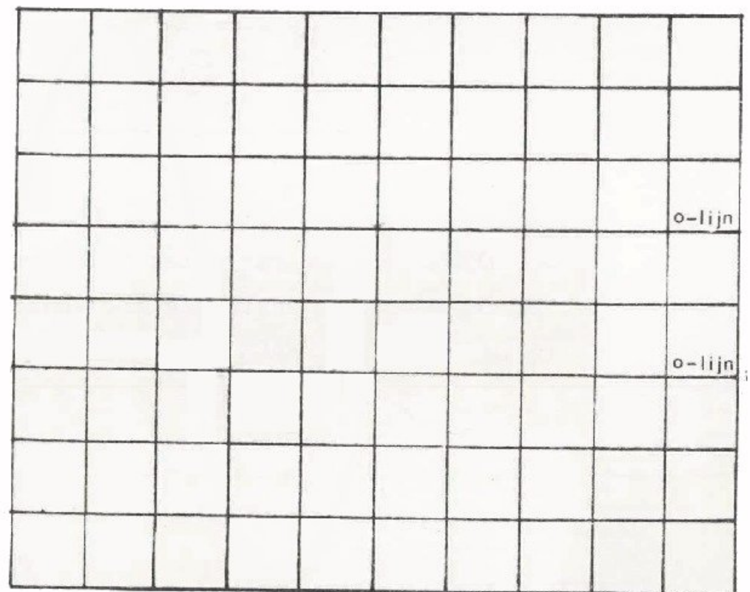
RC [<<] T

5.



Schets u_a en u_b voor de getekende stand van de knoppen.





C 3

INLEIDING ANALOGE SCHAKELINGEN

ENKELE PUNTEN UIT DE VORIGE LES

- Bij informatie-verwerking maakt men vaak gebruik van elektronische middelen.
- In de elektronica onderscheiden we analoge- en digitale informatieverwerking.
- In de digitale techniek gebruikt men grote aantallen van eenzelfde schakeling. Digitale schakelingen komen o.a. daarom in IC vorm voor.
- In de analoge techniek worden veel verschillende soorten schakelingen toegepast. Ofschoon hier het gebruik van IC's de laatste tijd aanzienlijk toeneemt, worden analoge schakelingen nog vaak uit afzonderlijke componenten opgebouwd.

WE GAAN NIET ALLE ANALOGE SCHAKELINGEN BEHANDELEN

In de analoge techniek komen zoveel uiteenlopende schakelingen voor, dat het nagenoeg onmogelijk is deze allemaal te behandelen. Neem bijvoorbeeld een analoge schakeling waarmee sinusvormige spanningen worden opgewekt, een zogenaamde "sinus-oscillator". Hiervan bestaan een groot aantal basisschakelingen. Bovendien kent men van elke basisschakeling tientallen verschillende uitvoeringen: met elektronenbuizen, met transistors, met FET's, enz. Het zou overigens zinloos zijn te pogen alle bestaande schakelingen te bestuderen. Men zou immers nooit klaar komen, omdat er dagelijks nieuwe schakelingen bijkomen.

We gaan dus niet *alle* analoge schakelingen behandelen.

Wat gaan we dan eigenlijk *wel* doen ?

WAT WE WEL GAAN DOEN

We delen de analoge schakelingen in *groepen* in. Elke groep is een verzameling van schakelingen die eenzelfde soort *verwerking* verrichten. Men zegt ook wel: die eenzelfde *functie* hebben. Zo bestaat er bijvoorbeeld een groep schakelingen met de functie: het opwekken van elektrische signalen. Alle schakelingen waarmee sinusvormige-, blokvormige- of zaagtandvormige spanningen worden verkregen behoren dus tot deze groep.
Een andere groep heeft de functie: het omzetten van niet-elektrische informatie in elektrische informatie. Alle schakelingen waarmee informatie omtrent licht, warmte, druk, rek, enz. wordt omgezet in overeenkomstige elektrische informatie behoren dus tot deze groep.

Op deze wijze krijgen we een zinvolle, overzichtelijke en praktische indeling van de vele analoge schakelingen. Zinvol, omdat de "soorten verwerkingen" in de toekomst weinig zullen veranderen. Een indeling naar functies veroudert dus niet zo gemakkelijk. Overzichtelijk, omdat het aantal voorkomende functies betrekkelijk klein is. In deze cursus worden de analoge schakelingen in 10 groepen (functies) ondergebracht.
Praktisch omdat deze manier van onderverdelen goed aansluit bij het werk van de meeste elektronici. Hierop komen we straks terug.

OEFENING

Deel onderstaande schakeling in naar functies:

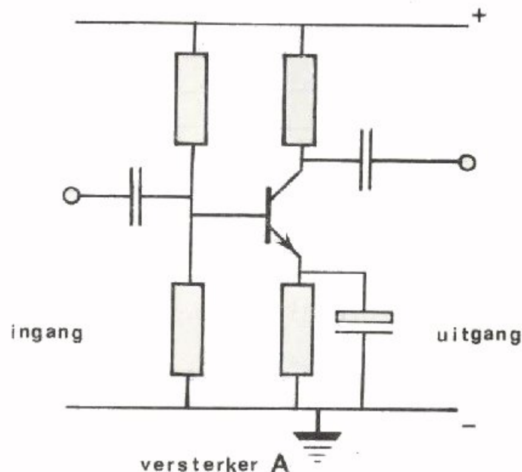
1. Een schakeling voor het voeden van een versterker.
2. Een schakeling voor het versterken van een wisselspanning.
3. Een schakeling voor het omzetten van wisselspanning in geluid.
4. Een schakeling voor het versterken van een microfoonsignaal.
5. Een schakeling voor het voeden van de gloeidraad van een elektronenstraalbuis.
6. Een schakeling voor het omzetten van gelijkstroom in warmte.

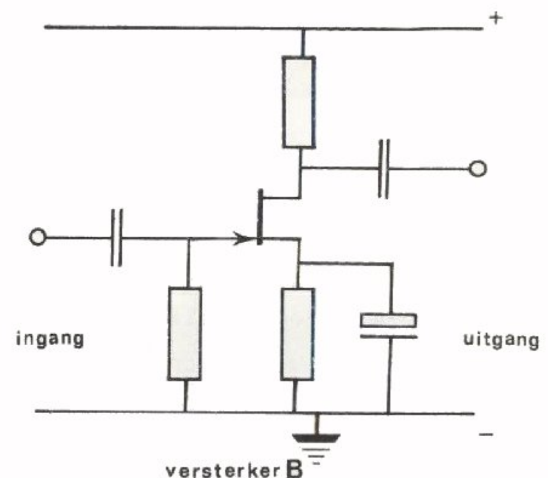
Schakelingen die bij elkaar horen
De nummers:
De nummers:
De nummers:

HET TEKENEN VAN SCHAKELINGEN MET EENZELFDE FUNCTIE

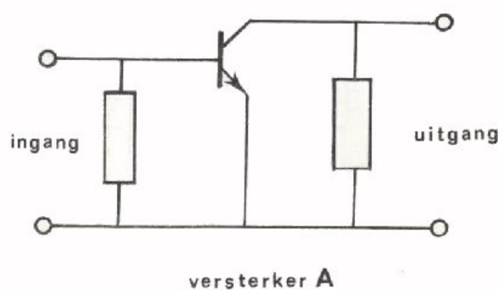
Door schakelingen met eenzelfde functie steeds *op dezelfde manier te tekenen* is het gemakkelijk nieuwe schakelingen te herkennen en te begrijpen.

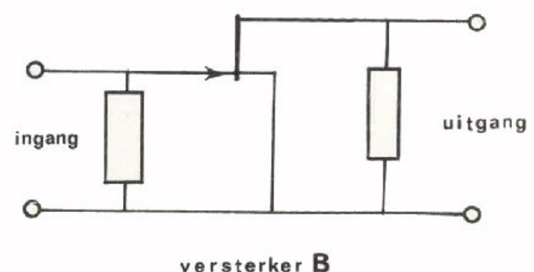
Hieronder zijn twee schakelingen getekend waarvan de functie "versterken" is. Versterker A is uitgerust met een NPN-transistor en de versterker B met een FET. Van beide schakelingen staat de ingang links en de uitgang rechts. De voedingsleidingen zijn boven (+) en onder (-) getekend. Met ⏚ wordt de verbinding met aarde weergegeven.



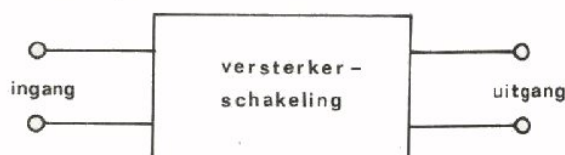


Als men wil nagaan hoe deze schakelingen zich voor wisselspanningen en wisselstromen gedragen kan men met voordeel een wisselstroom-vervangingsschema gebruiken. Ook hier zijn de ingangen links en de uitgangen rechts getekend. De voedingsleidingen en aardleidingen doen nu niet ter zake en zijn daarom in deze schema's weggelaten; de koppel- en ontkoppel-condensators zijn vervangen door kortsluitingen.





Als we alléén willen aangeven dat een schakeling "versterkt", is het niet van belang hoe de schakeling inwendig is opgebouwd. We kunnen zo'n schakeling dan weergeven door een blok met een ingang (links) en een uitgang (rechts).



of

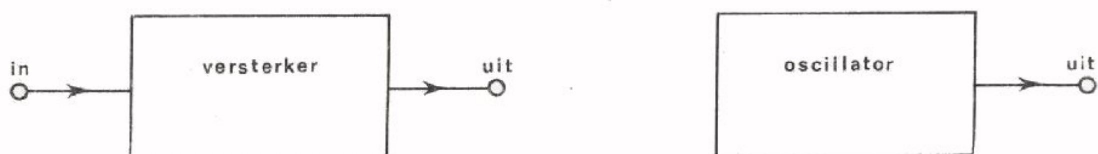


FUNCTIE-BLOKKEN

Zoals we op het vorige blad hebben gezien kunnen we een versterkerschakeling voorstellen door een blok met een ingang en een uitgang. Met deze voorstellingswijze wordt de nadruk gelegd op de *functie* van de schakeling: het *versterken* van de elektrische signalen. De informatie wordt aan de ingang toegevoerd. Aan de uitgang komt de versterkte informatie beschikbaar. Op soortgelijke wijze kunnen we een schakeling waarmee elektrische signalen worden *opgewekt* (een zogenaamde oscillator) door een blok weergegeven. Aan een oscillator wordt geen signaal toegevoerd zodat bij het oscillatorblok de ingang ontbreekt. Er is wel een uitgang; hier komt immers het in de oscillator opgewekte signaal beschikbaar.

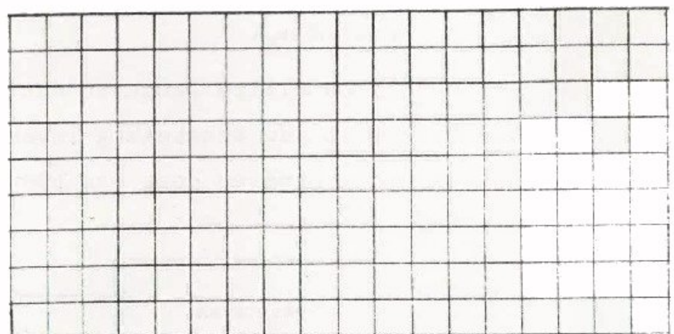


Deze voorstellingswijze kan men nog iets vereenvoudigen door de ingangen en de uitgangen met één in plaats van met twee lijnen weer te geven (zie onderstaande figuren). In werkelijkheid bestaat de ingang en de uitgang van een schakeling uit *twee* leidingen. Eén ervan ligt meestal aan aarde. Het is niet nodig deze aardleiding iedere keer opnieuw te tekenen. Wél is het van belang in de bloktekening aan te geven in welke richting de informatie wordt doorgegeven. Bij een versterker loopt de informatie *van* de ingang via "het blok" *naar* de uitgang. Bij een oscillator gaat de opgewekte informatie vanuit het blok *naar* de uitgang (volg de pijlen in onderstaande blokken).



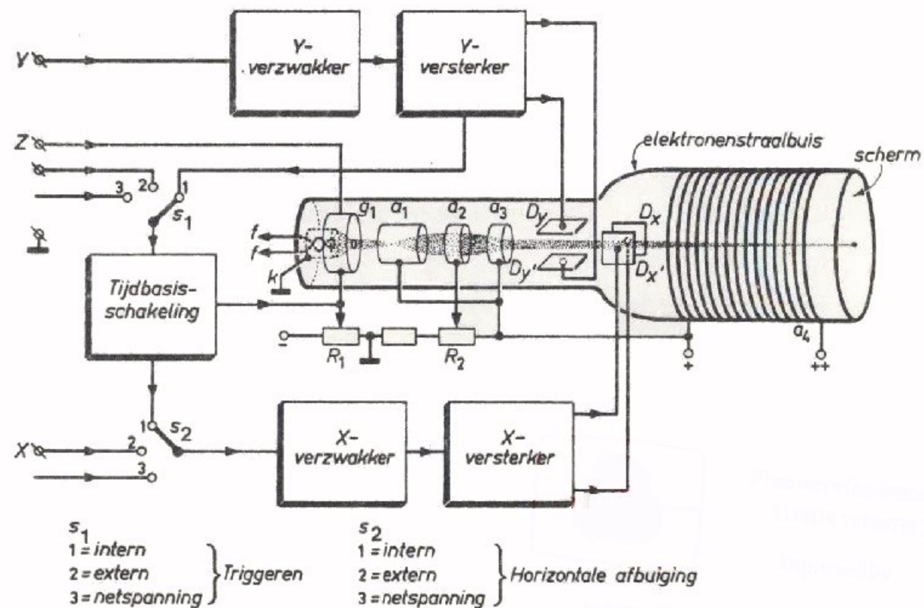
OEFENING

Teken hiernaast de blokvoorstelling van een verzwakkerschakeling.



FUNCTIE BLOKSCHEMA'S

Elektronische systemen (zoals een radio of een televisie) zijn opgebouwd uit een groot aantal schakelingen. Terwille van de overzichtelijkheid worden dergelijke systemen vaak weergegeven door middel van zogenaamde *functieblokschema's*. Als voorbeeld is hieronder het blokschema van een oscilloscoop getekend. Elk blok stelt een schakeling voor die een bepaalde functie verricht. De pijlen in de getekende verbindingen geven aan in welke richting informatie wordt doorgegeven.



OEFENINGEN

Welke verwerkingen ondergaat een signaal achtervolgens vanaf de Y-ingang tot de D_Y-afbuigplaten van de elektronenstraalbuis ?

Welke verwerkingen ondergaat een signaal achtervolgens vanaf de tijdbasisschakeling tot de D_X-afbuigplaten ?

Welke verwerkingen ondergaat een signaal achtervolgens vanaf de Y-ingang tot de tijdbasisschakeling ?

Welke verwerkingen ondergaat een signaal vanaf de Z-ingang van de oscilloscoop tot g_1 van de elektronenstraalbuis ?

HET WERKEN MET FUNCTIE-BLOKKEN IS PRAKTISCH

In het voorgaande hebben we elektrische schakelingen voorgesteld door blokken met een bepaalde functie. We hebben gezien hoe ingewikkelde elektronische systemen met behulp van een blokschema overzichtelijk kunnen worden weergegeven. Het werken met functie-blokken en functie-blokschema's sluit ook bijzonder goed aan bij het dagelijks werk van de elektronica-gebruiker. Dit laatste zullen we nu nader toelichten.

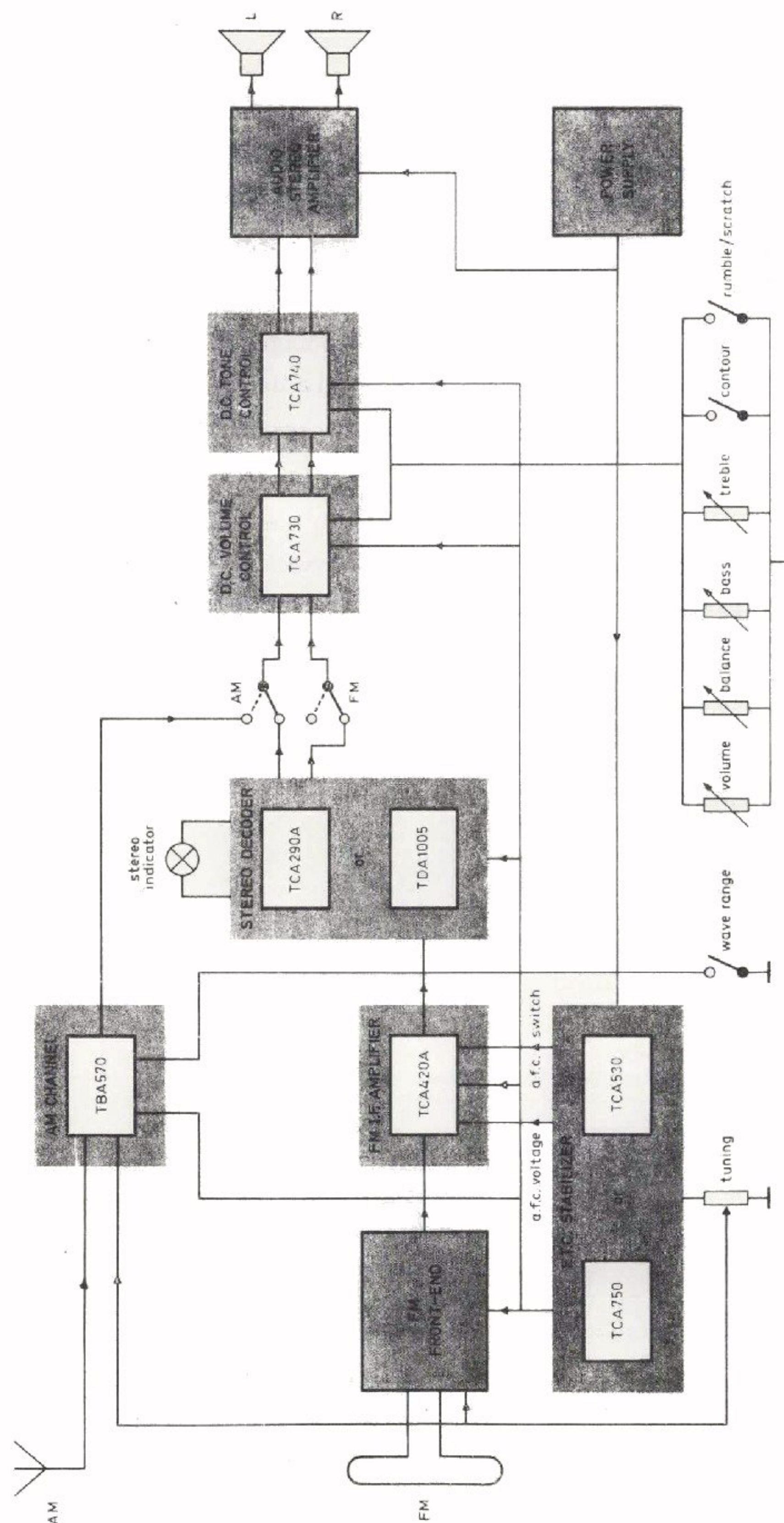
- In toenemende mate wordt er in de analoge techniek gebruik gemaakt van IC's. IC's bevatten schakelingen met bepaalde functies. Zo zijn er IC's waarin complete versterkers zijn ondergebracht. Hoe zo'n versterker is opgebouwd is voor het werk van een technicus niet van belang. De technicus kan binnen een IC toch niets veranderen of repareren. Wel moet hij weten op welke klemmen de voedingsspanningen moeten worden aangesloten; wat de ingangs- en de uitgangsklemmen zijn; hoe hoog de maximaal toelaatbare spanningen op de diverse aansluitklemmen zijn; hoeveel vermogen mag worden toegevoerd, etc. Kortom, de elektronicus behandelt een IC als een *functie-blok* met een aantal aansluitklemmen.

- Als een technicus bezig is met het repareren of het kontroleren van een elektronisch systeem heeft hij bewust of onbewust het blokschema van het systeem voor ogen.
  Per blok gaat hij dan na of de van buiten toegevoerde voedingsspanningen juist zijn; of de gewenste ingangsinformatie aanwezig is; of de te verwachten informatie aan de uitgang verschijnt. Met andere woorden, hij gaat na of de blokken goed *functioneren*.

- Blijkt een blok zijn functie niet goed uit te voeren dan moet hij dit verhelpen. Is het defecte blok een IC dan moet hij dit blok in zijn geheel door een ander vervangen; het defecte IC wordt weggegooid.
  Bestaat de defecte schakeling uit afzonderlijke componenten dan zal de fout binnen de schakeling moeten worden opgespoord. In dit geval dient de electronicus enige kennis te hebben van de werking van de afzonderlijke componenten.

Op pagina C03.7 is het blokschema van een AM-FM-ontvanger anno 1974 weergegeven. Elk blok vervult een bepaalde functie. De zwarte blokken zijn samengesteld uit afzonderlijke componenten.
De witte blokken zijn IC's (de nummering komt overeen met de typenummers van de IC's).

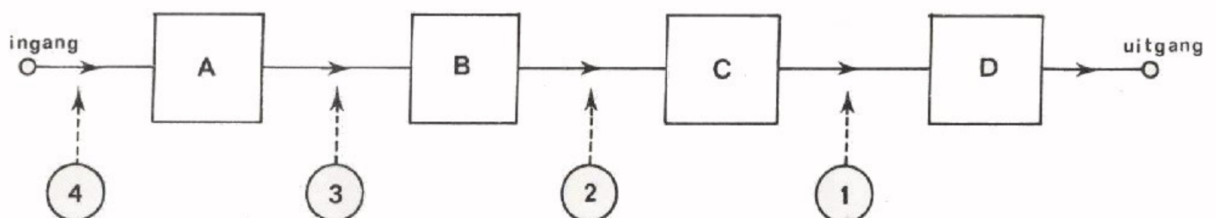
BLOKSCHEMA AM-FM ONTVANGER



NOG EENS: WAT GAAN WE IN HET C-TRAJECT DOEN ?

- Het aantal soorten analoge schakelingen is zeer groot; het aantal "functies" van deze schakelingen is betrekkelijk klein. We gaan daarom de analoge schakelingen verdelen in groepen van "schakelingen met eenzelfde functie".
- Een schakeling met een bepaalde functie stellen we voor door een blok met ingangen en/of uitgangen. De juiste inhoud van dit functie-blok is dan niet bekend. Wél hoe het met de uitwendige aansluitingen is gesteld. Met pijlen bij de uitwendige aansluitingen wordt aangegeven in welke richting informatie wordt doorgegeven.
- Van elk functie-blok zullen we nagaan welke "uitwendige" eigenschappen van praktisch belang zijn, zoals de weerstand tussen de ingangsklemmen, het verband tussen de in- en uitgangsspanning, de belastbaarheid van de uitgang enz.
- Daar in de analoge techniek nog vaak schakelingen met afzonderlijke componenten voorkomen, zullen we van elke functie enkele gangbare schakelingen onder de loep nemen.
- Aan het einde van het C-traject worden analoge systemen in blokschema besproken. Aan de orde komen: meetsystemen, een radio, een bandrecorder en een zwart-wit-televisie.

OEFENING



Een elektronisch systeem bestaat uit vier blokken A, B, C en D (zie figuur)

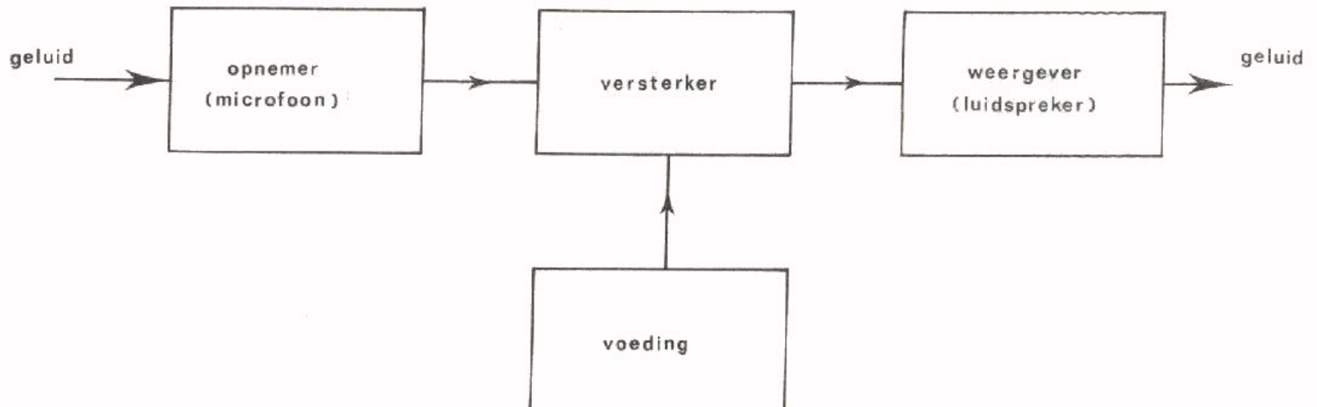
Het systeem blijkt defect te zijn. Om de fout op te sporen worden achtereenvolgens de voorgeschreven signalen toegevoerd aan de punten 1, 2, 3 en 4. De resultaten zijn:

- Spanning op punt 1: de spanning op de uitgang is juist.
- Spanning op punt 2: de uitgangsspanning is juist.
- Spanning op punt 3: geen uitgangsspanning.
- Spanning op punt 4: geen uitgangsspanning.

Welk blok is in ieder geval defect ? blok

AAN WELKE FUNCTIES HEEFT MEN BEHOEFTE IN DE ANALOGE TECHNIEK ?

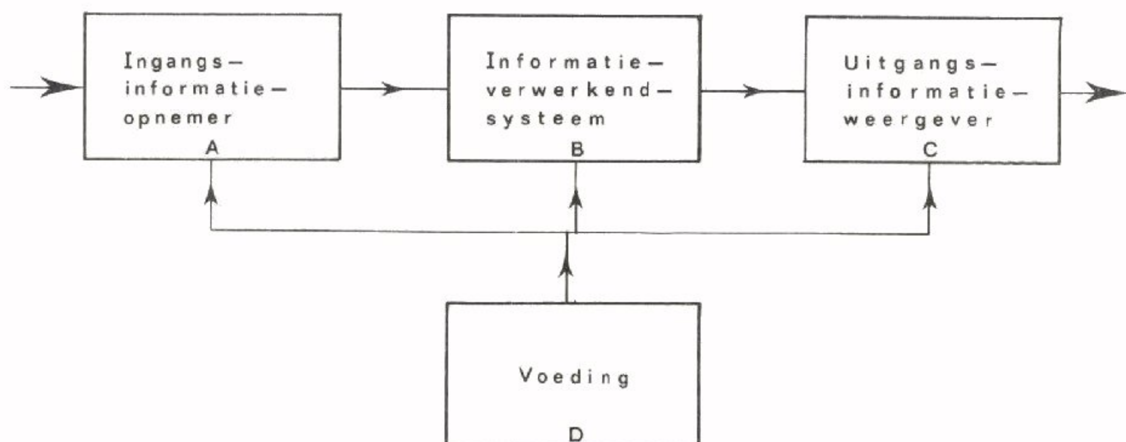
Om hierop een antwoord te krijgen gaan we na wat er bij elektronische verwerking van informatie zoal te pas komt. Als voorbeeld van een analoog verwerkend systeem nemen we een geluidsinstallatie (zie figuur).



Men kan in dit systeem *vier* hoofdbestanddelen onderscheiden:

- Een opnemer (microfoon), die het geluid omzet in evenredige elektrische spanningen.
- Een versterker, die het zwakke microfoon-signaal op de gewenste waarde brengt.
- Een weergever (luidspreker), die het versterkte signaal opnieuw omzet in geluid.
- een voeding, die de versterker van de noodzakelijke gelijkspanningen voorziet.

Bijna elk analoog systeem is samengesteld uit dezelfde soort hoofdbestanddelen: een ingangsinformatie-opnemer, een informatie-verwerkend systeem, een uitgangsinformatie-weergever en een voeding.



Op het volgend blad gaan we deze vier delen achtereenvolgens nader bekijken. We komen dan vanzelf tot de in praktijk gangbare functies.

Deel A: ingangsinformatie-opnemer.

De informatie aan de ingang van het verwerkend systeem moet in de vorm van een elektrische stroom of spanning beschikbaar zijn. De niet-elektrische ingangsinformatie moet dus eerst elektrisch worden gemaakt. Dit gebeurt met zogenaamde opneemschakelingen die als functie hebben: *het omzetten van niet-elektrische informatie in elektrische informatie.*

Voorbeelden zijn: het omzetten van geluid in een elektrische spanning met behulp van een microfoon; het omzetten van licht in een elektrische spanning met behulp van een LDR, enz.

Deel C: uitgangsinformatie-weergevers.

Na verwerking van de informatie door een elektronisch systeem moet de elektrische informatie weer worden omgezet in niet-elektrische informatie Voorbeelden zijn het omzetten van een elektrische spanning in geluid met behulp van een luidspreker; het omzetten van een elektrische stroom in een meteruitslag door middel van een draaispoelmeter, enz. Hier is de functie omzetten tegengesteld aan de omzetfunctie die bij deel A is genoemd. De functie van deze weergevers is dus: *het omzetten van elektrische informatie in niet-elektrische informatie.*

Deel B: informatieverwerkende systemen.

Dit deel verwerkt de elektrische ingangsinformatie zodanig dat de uitgangsinformatie geschikt is om de weergever te bedienen. Met behulp van de uitgangsinformatie moet bijvoorbeeld een luidspreker worden uitgestuurd, een motor in beweging worden gebracht of een lamp worden ontstoken.

- De elektrische signalen die door bronnen worden geleverd zijn vaak bijzonder klein. Een microfoon bijvoorbeeld levert signalen in de grootte orde van mV's; het antennesignaal van een radio of van een televisie heeft een amplitude van enige tientallen μV's. Deze signalen zijn te klein om een weergever uit te sturen. Daarom is er behoefte aan schakelingen met de functie: *het versterken van elektrische signalen.*

- Soms is het ingangssignaal van een verwerkend systeem zeer groot. Denk bijvoorbeeld maar eens aan een meetsysteem waarmee elektrische spanningen van 100 V en hoger moeten worden gemeten. Deze signalen moeten eerst worden verzwakt alvorens ze aan een weergever (bijv. een draaispoelmeter) kunnen worden toegevoerd.

  Er zijn dus schakelingen nodig met de functie: *het verzwakken van elektrische signalen.*

- Bij elektronische informatieverwerking komt het veelvuldig voor dat de vorm ("het verloop") van een signaal moet worden veranderd. Denk bijvoorbeeld aan een gelijkrichtschakeling die een wisselspanning verandert in een gelijkspanning. Zo zijn er ook schakelingen die sinusvormige signalen verwerken tot blokvormige signalen, of die van blokvormige spanningen driehoekvormige spanningen maken, enz.
  Dergelijke schakelingen hebben de functie: *het omvormen van elektrische signalen.*

- Soms is in een systeem een hulpsignaal nodig om de gewenste verwerkingen te kunnen uitvoeren. Een voorbeeld hiervan vindt men in een omroepzender. In een zendersysteem wordt de ingangsinformatie (het LF-geluidssignaal) op een HF-signaal gemoduleerd omdat het praktisch onmogelijk is LF-informatie draadloos over grote afstanden te transporteren. Het HF-signaal wordt in het zendersysteem zelf opgewekt. Dit gebeurt met zogenaamde generators of oscillators. Dit zijn schakelingen die als functie hebben: *het opwekken van elektronische signalen.*

- Het komt ook voor dat twee of meer signalen moeten worden verwerkt tot één nieuw signaal. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het optellen van een aantal signalen bij het vergelijken van signalen.
  Schakelingen die deze verwerkingen uitvoeren hebben de functie: *het mengen van elektrische signalen.*

- Elektrische signalen moeten worden getransporteerd. Binnen in een schakeling gebeurt dat meestal met gewone draadverbindingen. Met behulp van speciale kabels kan men over grote afstanden informatie overbrengen. Transport van informatie over zeer grote afstanden of in moeilijk toegankelijk gebieden gebeurt draadloos met behulp van radiogolven.
  "Schakelingen" die deze taak vervullen hebben de functie: *het transporteren van elektrische informatie.*

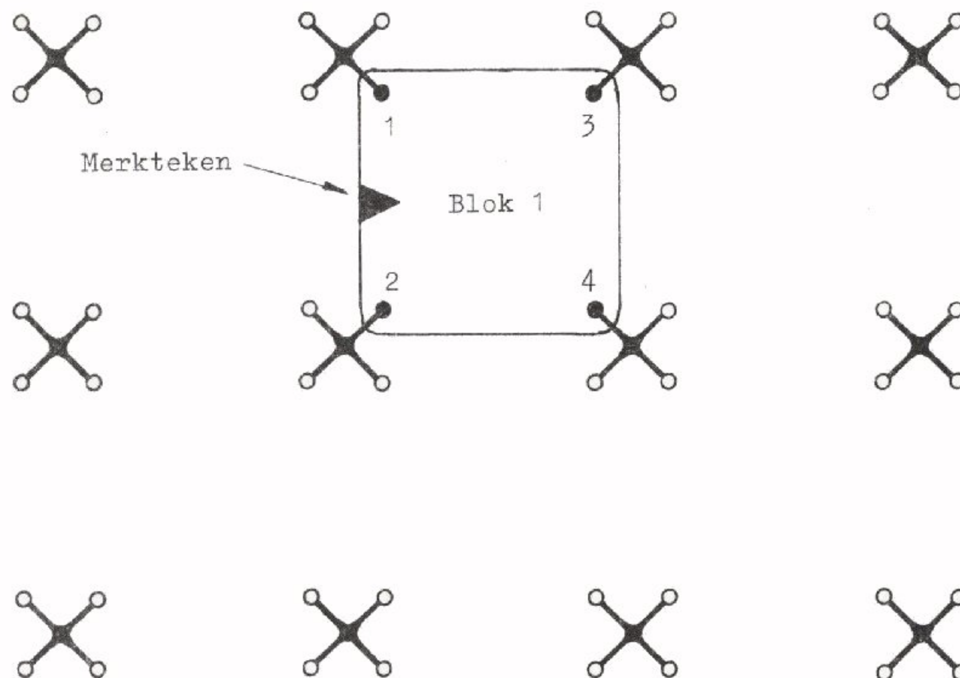
- Soms moet informatie voor lange of korte tijd worden vastgehouden. Middelen hiertoe zijn o.a.: de grammofoonplaat en de band van een recorder: hiermee kan uit elektrische signalen verkregen informatie gedurende onbeperkte tijd worden bewaard. Er zijn ook zogenaamde vertragingsschakelingen waarin elektrische signalen gedurende een bepaalde, betrekkelijk korte tijd vastgehouden worden. De functie van deze geheugen-schakeling is: *het bewaren van elektrische informatie.*

Deel D: voedingsschakelingen.

- Informatieverwerkende systemen en soms ook informatie-bronnen en informatie weergevers hebben gelijkspanningsvermogen nodig om goed te kunnen werken. Denk in dit verband maar eens aan de noodzakelijke collector- en basisspanningen van transistors. Deze gelijkspanningen worden betrokken van voedingsschakelingen. De functie hiervan is dus: *het leveren van gelijkspanningsvermogen.*

OPDRACHT: HET BEPALEN VAN DE FUNCTIE VAN BLOK 1

- Prik blok 1 op Uw paneel zoals hieronder is weergegeven. Het merkteken moet aan de *linker*kant liggen.



- De ingang van het blok ligt tussen de punten 1 en 2; de uitgang tussen de punten 3 en 4. 2 en 4 zijn de aardpunten.
- Voer een *sinusvormige* spanning van 1 kHz toe aan de ingang van het blok. Maak de generatorspanning maximaal.
- Bekijk de in- en uitgangsspanning met behulp van een oscilloscoop en bepaal de functie die het blok vervult.

  de functie is: 0 versterken
  0 verzwakken
  0 omvormen

- Herhaal voorgaande meting nadat een *blokvormige* spanning van 1 kHz aan de ingang is toegevoerd. De functie is nu:

  0 versterken
  0 verzwakken
  0 omvormen

- Uit deze meetopdracht kan men de conclusie trekken dat een elektronische schakeling soms *meer dan één* functie kan verrichten.

DE GROEPEN VAN SCHAKELINGEN DIE IN HET C TRAJECT WORDEN BEHANDELD

1. in → versterker-schakelingen → uit — De functie is *versterken.*

2. in → verzwakker schakeling → uit — De functie is *verzwakken*

3. oscillator-schakelingen → uit — De functie is *oscilleren*

4. in → omvorm-schakelingen → uit — De functie is *omvormen*

5. in → geheugen-schakelingen → uit — De functie is *bewaren (opslaan)*

6. in → transport-schakelingen → uit — De functie is *transporteren*

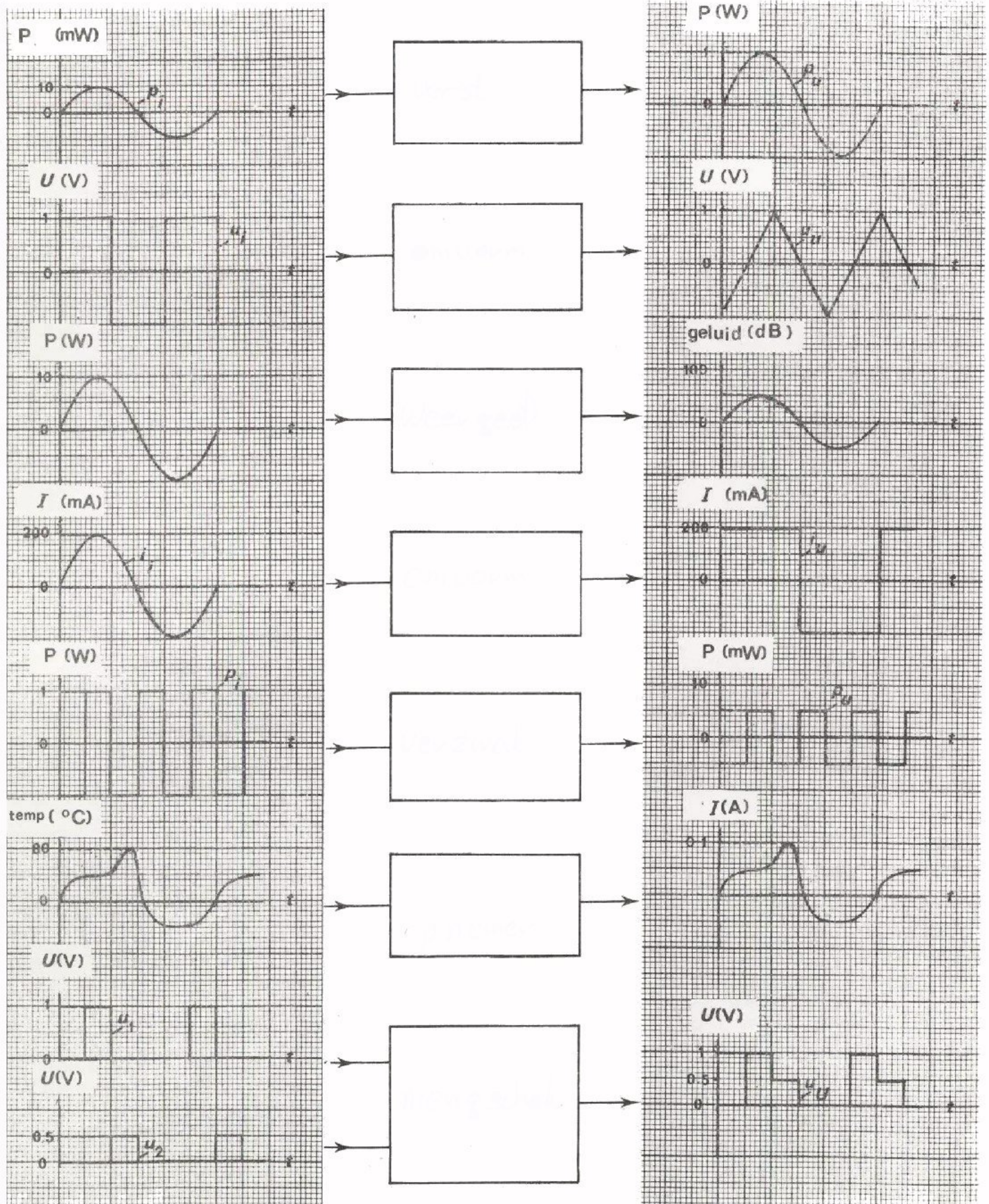
7. in, in, in → meng-schakelingen → uit — De functie is *mengen*

8. voedings-schakelingen → uit — De functie is *voeden*

9. niet elektr ingang → opneem-schakeling → uit — De functie is *opnemen*

10. in → weergeef-schakelingen → niet elektr. uitgang — De functie is *weergeven*

In onderstaande figuren zijn links de ingangssignalen en rechts de uitgangssignalen van een aantal schakelingen getekend. Vermeld in elk blok bij welke groep de desbetreffende schakeling hoort.



WELKE EIGENSCHAPPEN ZIJN VAN BELANG BIJ EEN FUNCTIE-BLOK ?

Een elektronisch systeem is samengesteld uit een aantal schakelingen, die elk hun eigen functie hebben. Als een technicus in een systeem een storing moet opsporen, dan maakt hij gewoonlijk gebruik van het functie-blokschema van het systeem. Hij gaat systematisch na of elk blok goed functioneert. Dit kan hij constateren door metingen aan de uitwendige aansluitklemmen van de blokken. Hij vergelijkt daarna de meetresultaten met de gegevens van de eigenschappen van die blokken.

Belangrijke eigenschappen tussen de aansluitklemmen van blokken zijn:

- Aan de ingang(en):
  - de ingangsweerstand. Deze is van belang omdat de ingang van een blok de belasting is van het voorgaande blok.
  - de maximaal toelaatbare ingangsspanning, ingangsstroom en het maximaal toelaatbare ingangsvermogen. Met deze gegevens kent men de beperkingen ten aanzien van het toe te voeren signaal.
- Aan de uitgang:
  - De uitgangsweerstand. Deze is van belang omdat de uitgang van een blok het signaal levert aan het volgende blok.
  - Belastbaarheid. Hiermee wordt aangegeven hoeveel stroom, spanning en vermogen een blok kan leveren.
- Tussen in- en uitgang:
  - De stroom-, spannings- en vermogensoverdracht van ingang naar uitgang. Bijvoorbeeld de versterking, de verzwakking.
  - het tijdsverschil tussen in- en uitgangssignaal.

Aan deze punten wordt bij de komende behandeling van de blokken telkens aandacht besteed.

OEFENINGEN

Bij welke groep(en) van schakelingen (zie blad C03.13) zijn alléén de elektrische *ingangs*eigenschappen van belang ?

Bij welke groep(en) van schakelingen zijn alleen de elektrische *uitgangs*-eigenschappen van belang ?

Bij versterkerschakelingen zijn belangrijk:

ingangseigenschappen/uitgangseigenschappen/overdrachtseigenschappen

SAMENVATTING

- In het analoge deel gaan we *niet* alle mogelijke schakelingen behandelen; dat zijn er veel te veel, sommige verouderen, nieuwe komen erbij.

- We gaan wél de in de praktijk voorkomende verwerkingen of *functies* onder de loep nemen. Dit is een beperkt aantal en bovendien niet aan veroudering onderhevig. De functies blijven bestaan.

- Daarom verdelen we de schakelingen in *groepen*, waarbij alle schakelingen van een groep *eenzelfde functie* hebben.

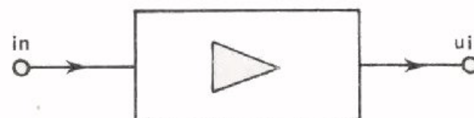
De gangbare functies zijn:	De groepen van schakelingen zijn:
1. Versterken	1. Versterkerschakelingen
2. Verzwakken	2. Verzwakkerschakelingen
3. Oscilleren	3. Oscillatorschakelingen
4. Omvormen	4. Omvormschakelingen
5. Mengen	5. Mengschakelingen
6. Bewaren of opslaan	6. Geheugenschakelingen
7. Voeden	7. Voedingsschakelingen
8. Transporteren	8. Transportschakelingen
9. Opnemen	9. Opneemschakelingen
10. Weergeven	10. Weergeefschakelingen

- Elke schakeling met een bepaalde functie is voor te stellen door een *blok* (een zogenaamd functie-blok) met een aantal aansluitklemmen.

Voorbeeld:



In- en uitgang hebben meestal een klem gemeenschappelijk



Vereenvoudigde voorstelling. De pijlrichting komt overeen met de richting van de informatie-overdracht.

- Van een functie-blok behoeft de inhoud niet bekend te zijn.
  Wél de eigenschappen die tussen de aansluitklemmen zijn te meten. Deze vertellen hoe het blok zich gedraagt; zij leggen de functie vast.

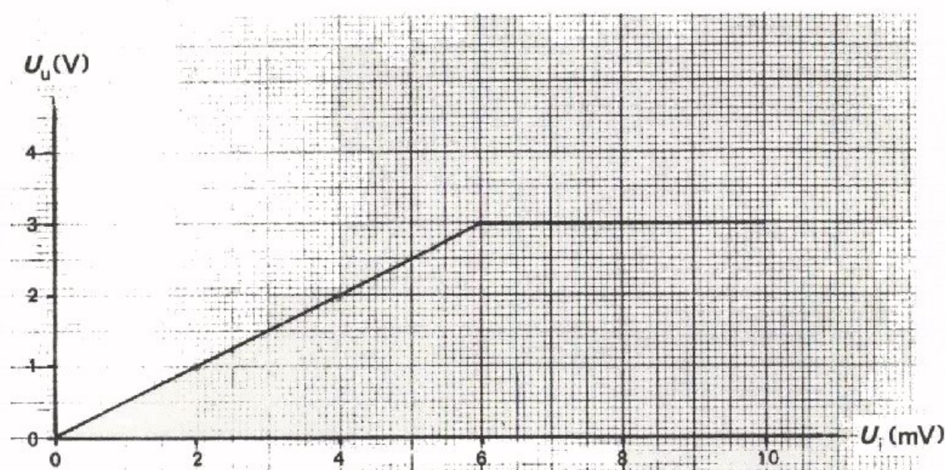
- Een elektronisch systeem stelt men vaak voor als een verzameling van blokken met onderlinge verbindingen. Dit is het *functie - blokschema*, waarmee handig is te werken als het hele systeem gecontroleerd of gerepareerd moet worden.

NAAM: [ ] KLAS: [ ]

1.



Van deze versterker hebben we de ingangsspanning en de uitgangsspanning gemeten. De meetresultaten zijn uitgezet in de volgende grafiek.



- Bij een ingangsspanning van 2 mV is de uitgangsspanning

  U_u = [ ] V

- Een uitgangsspanning van 2 volt kan men verkrijgen bij een ingangsspanning van

  U_i = [ ] mV

- De maximale uitgangsspanning is

  $U_{u(max)}$ = [ ] V

- Het maximale vermogen dat de versterker kan leveren is

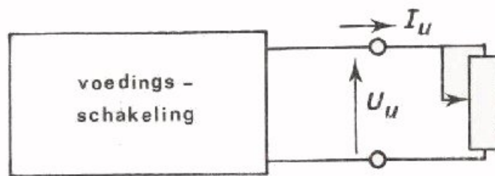
  $P_{u(max)}$ = [ ] mW

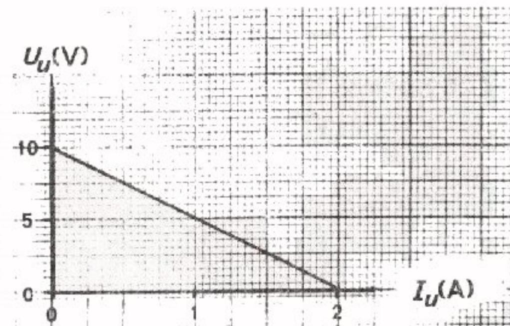
- De maximaal toelaatbare ingangsspanning, als geen vervorming van u_u mag optreden is

  $U_{i(max)}$ = [ ] mV

- Hoe groot is de versterking ? A_U = [ ]

2. Van een voedingsschakeling is de uitgangsspanning bij diverse waarden van de uitgangsstroom gemeten. Onderstaande grafiek geeft de resultaten.





- Bij een uitgangsstroom van 1A is de uitgangsspanning

U_U = [V]

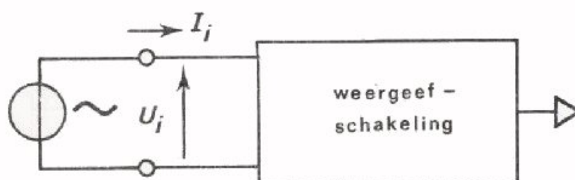
- De uitgangsweerstand van de voedingsschakeling bedraagt:

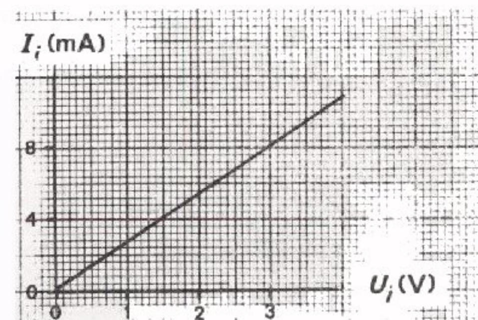
R_U = [Ω]

- Het maximale vermogen dat de voedingsschakeling kan leveren is

P = [W]

3. Van een weergeefschakeling zijn de ingangsspanning en de ingangsstroom gemeten. De resultaten ziet U in de volgende grafiek.





- Bij een ingangsspanning van 1,5 V vloeit er een ingangsstroom van

I_i = [mA]

- Voor een ingangsstroom van 6 mA moet de ingangsspanning

U_i = [V] zijn.

- De ingangsweerstand van de weergeefschakeling bedraagt

R_i = [Ω]

C 4 VERSTERKERSCHAKELINGEN I

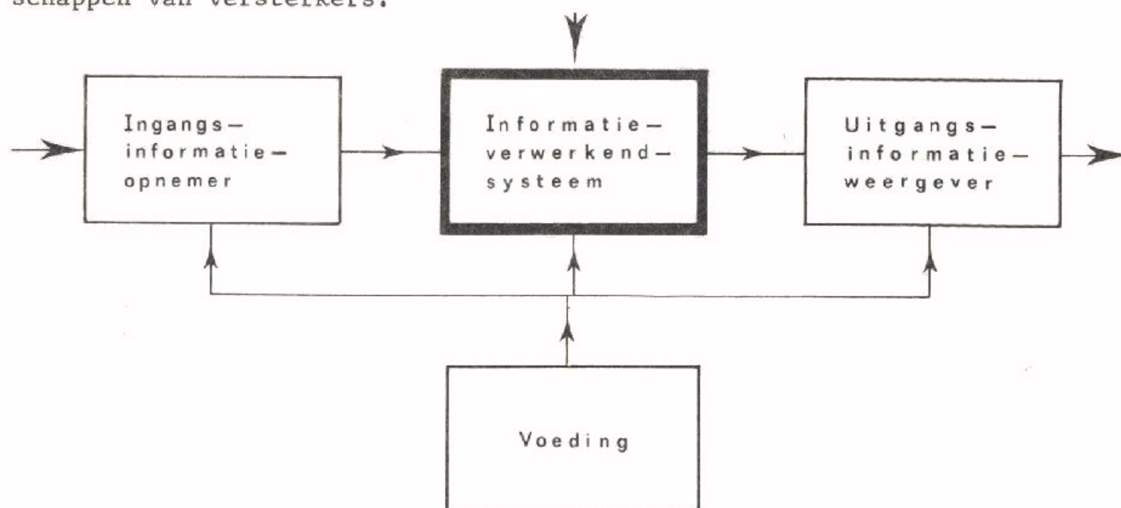
DE UITWENDIGE EIGENSCHAPPEN VAN VERSTERKERS

DE BELANGRIJKSTE PUNTEN UIT DE VORIGE LES

- We hebben de analoge schakelingen verdeeld in 10 groepen.
  Een groep bestaat uit schakelingen die eenzelfde functie verrichten.
- In deze cursus komen de volgende groepen van schakelingen aan de orde.
  1. Versterkerschakelingen met de functie versterken.
  2. Verzwakkerschakelingen met de functie verzwakken.
  3. Oscillatorschakelingen met de functie oscilleren (opwekken)
  4. Omvormschakelingen met de functie omvormen.
  5. Mengschakelingen met de functie mengen.
  6. Geheugenschakelingen met de functie bewaren(opslaan).
  7. Voedingsschakelingen met de functie voeden.
  8. Transportschakelingen met de functie transporteren.
  9. Opneemschakelingen met de functie opnemen.
  10. Weergeefschakelingen met de functie weergeven.
- Een schakeling met een bepaalde functie kan men voorstellen door een "blok" met een aantal aansluitklemmen.
- Een elektronisch systeem kan men uitbeelden als een verzameling van blokken met onderlinge verbindingen.

WAT WE IN DEZE LES DOEN

We starten met de functie "versterken van elektrische signalen". Deze functie behoort in een analoog systeem tot het blok "informatieverwerking" (zie figuur). In deze les houden we ons bezig met de *uitwendige* eigenschappen van versterkers.



WAT BEDOELEN WE MET "VERSTERKEN" ?

Een versterker stellen we voor door een blok met een ingang en een uitgang. Aan de ingang wordt het te versterken "ingangssignaal" toegevoerd. Aan de uitgang komt het versterkte signaal als "uitgangssignaal" ter beschikking.



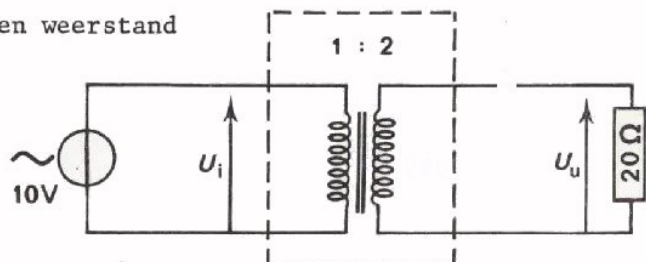
We spreken van *versterken* van een elektrisch signaal als aan de volgende twee voorwaarden wordt voldaan.

1. Het door de uitgang afgegeven *vermogen* moet groter zijn dan het aan de ingang toegevoerde *vermogen*.
2. Het uitgangssignaal moet dezelfde *vorm* hebben als het ingangssignaal.

Om te kunnen versterken moet een versterker een of meer *actieve* componenten bevatten, zoals transistors. Verder gebruikt men in versterkers passieve componenten, zoals weerstanden, condensators, spoelen en transformators.

OEFENING

Een "verliesvrije" transformator (1:2) is aangesloten op een spanning van 10 V (effectief). De transformator is belast met een weerstand van 20Ω (zie figuur).



- Hoe groot is de uitgangsspanning U_u?

U_u = | V |

- De uitgangsspanning van deze schakeling is dus **groter/kleiner** dan de ingangsspanning.

- Het door de uitgang afgegeven vermogen is

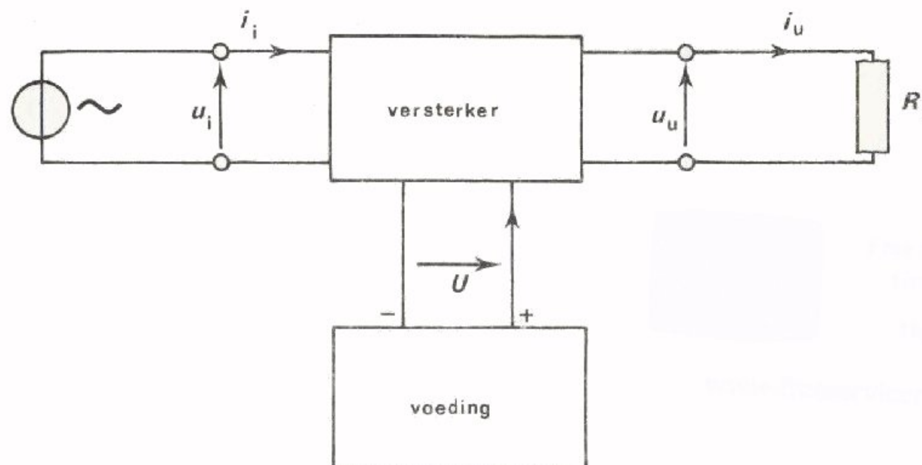
P_u = | W |

- Het aan de ingang toegevoerde vermogen is

P_i = | W |

- De schakeling behoort dus **wel/niet** tot de groep van de versterkers.

Bij een praktische versterker krijgen we de volgende toestand.



Aan de ingang wordt het te versterken elektrische signaal toegevoerd, bijvoorbeeld de wisselspanning u_i, die de wisselstroom i_i doet lopen. Er wordt zo toegevoerd het vermogen:

$$P_i = u_i \cdot i_i$$

Aan de uitgang wordt het versterkte signaal afgegeven. De uitgang levert de wisselspanning u_u bij de wisselstroom i_u.
Aan de belasting R_l wordt afgegeven het vermogen:

$$P_u = u_u \cdot i_u$$

In geval van versterking is P_u groter dan P_i; er heeft dan *vermogensversterking* plaats. Deze is:

$$A_P = \frac{P_u}{P_i} = \frac{u_u \cdot i_u}{u_i \cdot i_i}$$

We moeten hierbij opmerken dat het optreden van vermogens*versterking* niet wil zeggen "dat de versterker er vermogen bij maakt". In werkelijkheid kan P_u alleen maar groter zijn dan P_i als de voeding daarvoor voldoende *voedingsvermogen* $U.I$ toevoert.

Men zal nooit meer vermogen P_u van de versterker kunnen afnemen dan dat er in totaal aan vermogen $(U.I + P_i)$ wordt ingestopt. Omdat er altijd verliezen in de versterker optreden, zal P_u in de praktijk kleiner zijn dan $U.I$

$$P_u < U.I$$

P_i is in de regel véél kleiner dan $U.I$ en daarom letten we niet meer op P_i.

VOORBEELD

Aan de ingang van een versterker voert men toe U_i = 100 mV bij I_i = 0,1 mA. Dan is:

$$P_i = U_i \cdot I_i = (100.10^{-3})(0{,}1 \cdot 10^{-3})$$

$$= 10^{-1} \cdot 10^{-4} = 10^{-5}\ \text{W} = 10\ \mu\text{W}$$

De versterker levert aan de uitgang U_u = 2 V bij I_u = 5 mA. Hieruit volgt

$$P_u = U_u \cdot I_u = 2(5.10^{-3})$$

$$= 10.10^{-3} = 10^{-2}\ \text{W} = 10^4\ \mu\text{W}$$

De vermogensversterking van deze versterker is dus:

$$A_P = \frac{P_u}{P_i} = \frac{10^4}{10} = 10^3 = 1000$$

OEFENING

Van een versterker is:

U_i = 10 mV bij I_i = 10 µA
U_u = 1 V bij I_u = 10 mA

Het ingangsvermogen is: P_i = [µW]

Het uitgangsvermogen is: P_u = [W]

De vermogensversterking is: A_P = [ ]

De voeding moet een vermogen leveren dat groter is dan

$U.I$ > [mW]

Als de voedingsspanning 10 V bedraagt, hoeveel gelijkstroom neemt de versterker dan tenminste op ?

I > [mA]

De versterker is belast met een weerstand R_L. Deze heeft een waarde van

R_L = [Ω]

VERMOGENSVERSTERKING UITGEDRUKT IN BEL

Een vermogensversterking kan men uitdrukken in bel (afgekort B). Wat betekent dat ?

Eerst enkele voorbeelden.

- Een vermogensversterking van 2 bel wil zeggen:

$$A_p = 10^2 = 100$$

- Een vermogensversterking van 3 bel wil zeggen:

$$A_p = 10^3 = 1000$$

- Een vermogensversterking van 1 bel wil zeggen:

$$A_p = 10^1 = 10$$

Als men de vermogensversterking opschrijft als een *macht van tien*, dan komt de *exponent* van die macht overeen met het *aantal bel*.

Zo geldt:

A_p = 2 bel betekent $A_p = 10^2 = 100$

A_p = 5 bel betekent $A_p = 10^5 = 100\ 000$.

Boven is reeds vermeld dat "bel" wordt afgekort met B. We kunnen ook stellen:

A_p = 2 B betekent $A_p = 10^2 = 100$.

A_p = 5 B betekent $A_p = 10^5 = 100\ 000$.

OEFENINGEN

A_p = 4 B betekent A_p = [ ]

A_p = 0 B betekent A_p = [ ]

Als P_i = 10 µW en P_u = 100 W, dan is A_p = [B]

Als P_i = 100 µW en A_p = 3 B, dan is P_u = [mW]

Als P_u = 1 W en A_p = 5 B, dan is P_i = [µW]

DE DECIBEL

In de praktijk wordt een vermogensversterking bijna altijd in *decibel* (afgekort dB) in plaats van in *bel* uitgedrukt.

U weet dat 1 decimeter = 1/10 m, en 1 deciliter = 1/10 l.
Zo is: 1 decibel = 1/10 B.

Een vermogensversterking A_p van bijvoorbeeld 20 dB wil dus zeggen:

$$A_p = \frac{20}{10} \text{ Bel} = 2 \text{ B} = 10^2 = 100$$

Samenvattend:

Door het aantal dB te delen door 10 krijgt men het aantal B. Dit aantal B is de exponent van de macht van 10.

Wat nu als men bijvoorbeeld te maken krijgt met een vermogensversterking A_p = 28 dB ?
Men kan stellen A_p = 28 dB = 2,8 B.
Dit betekent vervolgens het voorafgaande:

$$A_p = 10^{2,8}$$

We hebben te weinig wiskunde geleerd om precies te weten wat dit betekent. Toch kunnen we er wel iets van zeggen. Immers 2,8 ligt tussen 2 en 3, zodat:

$10^{2,8}$ ligt tussen 10^2 en 10^3
A_p ligt tussen 100 en 1000.

OPMERKING

In het vervolg van deze cursus komt de uitdrukking A_p = 3 dB enige malen aan de orde.

$$\boxed{A_p = 3 \text{ dB betekent: } \frac{P_u}{P_i} = 2}$$

OEFENINGEN

A_p = 10 dB betekent A_p = [B] of A_p = [ ]

A_p = 50 dB betekent A_p = [B] of A_p = [ ]

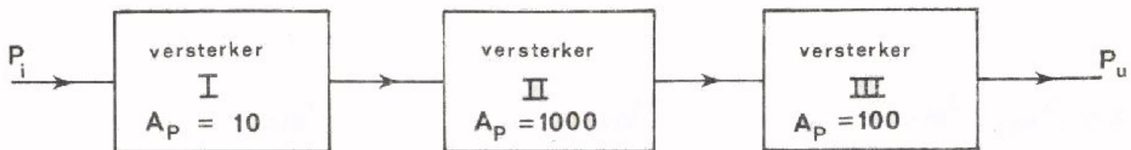
Als P_i = 0,1 mW en P_u = 1 W, dan is A_p = [dB]

Als A_p = 37 dB,
dan ligt A_p in tussen [dB] en [dB]

Dit is tussen [ ] en [ ]

HET OPTELLEN VAN DECIBELS

In onderstaande figuur zijn drie versterkers achter elkaar geschakeld. De vermogensversterking van versterker I is bijvoorbeeld 10, die van versterker II is 1000 en die van III is bijv. 100.



De totale vermogensversterking $\frac{P_u}{P_i}$ is gelijk aan:

$$10 \times 1000 \times 100 = 1\,000\,000 = 10^6.$$

De totale vermogensversterking kan men dus berekenen door de A_P's van elke versterker met elkaar te *vermenigvuldigen*.

Hoe bepaalt men de totale vermogensversterking als de A_P van de versterkers I, II en III in dB's zijn uitgedrukt ?

Van versterker I is A_P = 10 = 1B = 10 dB.

Van versterker II is A_P = 1000 = 3B = 30 dB.

Van versterker III is A_P = 100 = 2B = 20 dB.

De totale vermogensversterking is 10^6 = 6B = 60 dB.

Kennelijk moet men de dB's van de afzonderlijke versterkers *optellen* om de totale vermogensversterking in dB's te verkrijgen: 10 dB + 30dB + 20 dB = 60 dB.

VOORBEELD

Vier versterkers worden achter elkaar geschakeld.

Van versterker 1 is A_P = 12 dB

Van versterker 2 is A_P = 6 dB

Van versterker 3 is A_P = 7 dB

Van versterker 4 is A_P = 15 dB

De totale vermogensversterking is 12 + 6 + 7 + 15 = 40 dB = 4B.

A_P (totaal) is dus 10 000.

OEFENING

Een 3-traps versterker versterkt 50 dB.

De versterking van de 1ste trap is 18 dB.

De versterking van de 3de trap is 12 dB.

De versterking van de 2de trap is [ ] dB

Het uitgangsvermogen van de 2de trap is dus [ ] -maal zo groot als het ingangsvermogen van die trap.

STROOM- EN SPANNINGSVERSTERKING

We komen nog eens terug op de versterker en stellen hem weer als "blok" voor.



Tot nu toe is in deze les alleen de vermogensversterking A_p ter sprake gekomen:

$$A_p = \frac{p_u}{p_i} = \frac{u_u}{u_i} \cdot \frac{i_u}{i_i} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Andere belangrijke eigenschappen van een versterker zijn de *stroomversterking* A_i en de *spanningsversterking* A_u.

$$\boxed{A_i = \frac{i_u}{i_i}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

$$\boxed{A_u = \frac{u_u}{u_i}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

Uit de formules (1), (2) en (3) volgt $\frac{u_u \cdot i_u}{u_i \cdot i_i} = \frac{u_u}{u_i} \cdot \frac{i_u}{i_i}$, of

$$\boxed{A_p = A_u \times A_i}$$

OEFENING

Van een versterker is A_p = 40 dB en P_i = 1 mW.

Het uitgangsvermogen bedraagt P_u = [W]

Verder is de uitgangsspanning 10V

Dan is de uitgangsstroom I_u = [A]

De ingangsspanning is 100 mV.

Dan is de spanningsversterking A_u = [ ]

Tenslotte is de stroomversterking A_i = [ ]

NOG ENKELE VOORBEELDEN

Als we praten over "versterken" dan bedoelen we *vermogensversterking*. Voor vermogensversterking is het niet noodzakelijk dat er én spanningsversterking én stroomversterking optreedt. In de praktijk is dat ook niet altijd het geval.
We geven enkele voorbeelden.

Stel dat van een schakeling $A_i = 0,8$ en $A_u = 50$, dan is $A_p = 0,8 \times 50 = 40$

Ondanks het feit dat hier de stroomversterking kleiner is dan 1, treedt er tóch vermogensversterking op. De desbetreffende schakeling behoort dus tot de groep van versterkers.

Als van een schakeling bijv. $A_u = 0,3$ en $A_i = 10$, dan is $A_p = 3$.

Ofschoon hier de spanningsversterking kleiner is dan 1, hebben we tóch met een "versterker" te doen.

DE VERTRAGINGSTIJD

Het ingangssignaal heeft altijd enige tijd nodig om de versterker te doorlopen en daarna als uitgangssignaal ter beschikking te komen. Dit is te wijten aan het feit dat in een versterker condensators, spoelen en transistors of elektronenbuizen voorkomen.

- Het veranderen van een condensatorspanning (laden of ontladen) kost tijd.
- Het veranderen van de stroom door spoel (aangroeien of afnemen) kost tijd.
- Ook de ladingsdragers in transistors en elektronenbuizen hebben tijd nodig om zich te verplaatsen.

Dit alles heeft tot gevolg dat het uitgangssignaal iets *later* ter beschikking komt dan dat het ingangssignaal aan de ingang wordt toegevoerd. Er heeft een zekere vertraging plaats. De tijd die het signaal nodig heeft om van ingang naar uitgang te komen noemt men de *vertragingstijd*.

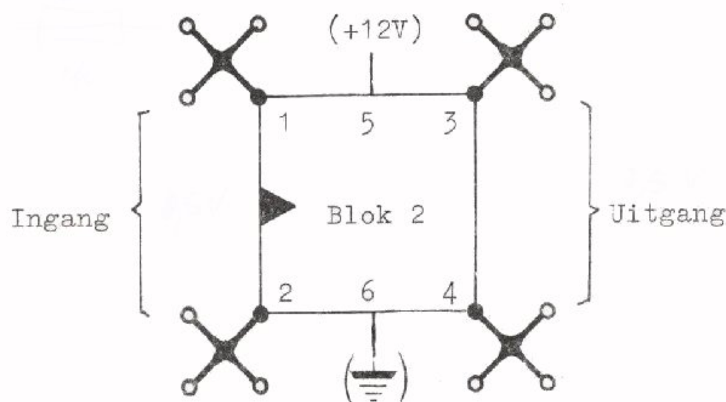
Over het algemeen zijn de vertragingstijden zéér klein, liggend in de orde van grootte van microseconden of nanoseconden. In de HF-versterkertechniek kunnen ze echter een belangrijke rol spelen. De theorie hierover is echter te ingewikkeld om er in deze analoge techniek-lessen dieper op in te gaan.

DE OVERDRACHTS-EIGENSCHAPPEN

De grootte van A_u, A_i, A_P en de vertragingstijd geven aan hoe de ingangssignalen naar de uitgang worden "overgedragen". Daarom noemt men deze gegevens de *overdrachtseigenschappen* van de versterker.

OPDRACHT: HET METEN AAN EEN VERSTERKERBLOK

- Prik blok 2 midden op Uw paneel (let op het merkteken).



- De ingang van het blok ligt tussen de punten 1 en 2; de uitgang tussen de punten 3 en 4, 2 en 4 zijn de aardpunten.

- Voer aan de ingang een sinusvormige wisselspanning toe van U_{tt} = 0,5 V bij f = 1 kHz. Belast de uitgang met een weerstand van 10 kΩ.

- Leg een voedingsspanning van 12 V aan. Verbind punt 5 met de + van de voeding en punt 6 met ⏚ .

- Meet de spanningsversterking met behulp van de oscilloscoop.

A_u = [ ]

- Bepaal de ingangsstroom van het blok. Meet hier de spanning over een weerstand van 1 kΩ in serie met punt 1 ($i = \frac{u_r}{R}$). Zorg dat tussen 1 en 2 de spanning 0,5 V blijft.

- De ingangsstroom is I_{it} = [ ] μA

- Bereken de uitgangsstroom. Deze is I_{ut} = [ ] μA

- De stroomversterking is A_i = [ ]

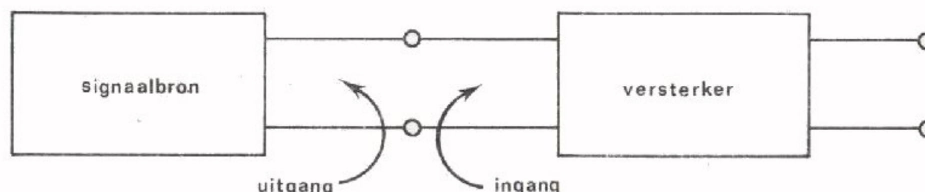
- De vermogensversterking is A_p = [ ]

Breek de schakeling nog niet af. Schakel wel de voedingsspanning en de generatorspanning uit.

INGANGSEIGENSCHAPPEN VAN EEN VERSTERKER

In de praktijk wordt de ingang van een versterker aangesloten op de uitgang van een voorgaande schakeling die het signaal voor de versterker levert (zie figuur). In dit verband zijn de volgende versterker-eigenschappen van belang.

- *De maximaal toelaatbare waarden van de ingangsstroom, de ingangsspanning en het ingangsvermogen.* De door de signaalbron geleverde stroom, de spanning en het vermogen mogen niet groter zijn dan deze maximumwaarden.
- *De grootte van de ingangsweerstand.* De ingang van een versterker vormt namelijk een belasting voor de uitgang van een signaalbron.



HET MAXIMAAL TOELAATBARE INGANGSSIGNAAL

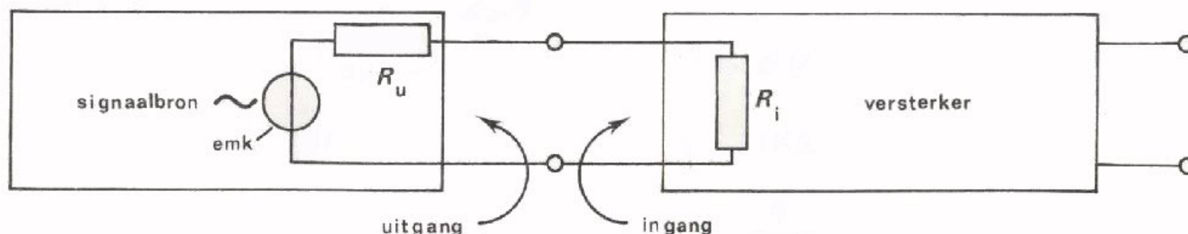
In de eerste plaats mag het ingangssignaal niet te groot zijn om *beschadiging* van de versterker te voorkomen.

- Door te grote stroom kunnen bijvoorbeeld weerstanden verbranden.
- Door te grote spanning kan doorslag van isolatie optreden.
- Door een te groot vermogen kan te sterke verhitting optreden.

In de tweede plaats wordt de grootte van het ingangssignaal beperkt door de eis dat het signaal niet *vervormd* mag worden. Bij een te groot ingangssignaal zal de versterker "vastlopen", waardoor vervorming van het uitgangssignaal ontstaat.

DE INGANGSWEERSTAND VAN EEN VERSTERKER

De ingangsweerstand van een versterker staat in serie met de uitgangsweerstand van de signaalbron (zie figuur). De ingangsspanning van de versterker is dus lager dan de emk van de signaalbron.



OEFENING

Een signaalbron met een emk van 9 V en een R_u = 600Ω levert een signaal aan een versterker met een R_i = 1,2 kΩ.

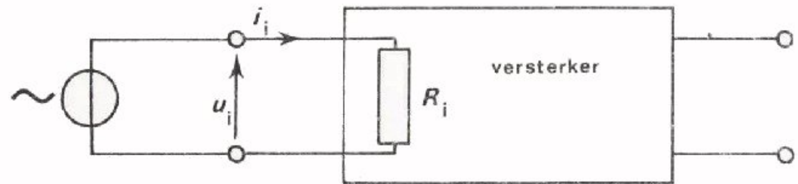
De signaalbron levert aan de versterker:

I_{eff} = [mA] U_{eff} = [V] P = [mW]

HOE METEN WE DE INGANGSWEERSTAND ?

Zoals we op het vorige blad hebben gezien is de ingangsweerstand van een versterker van belang omdat hij een belasting vormt voor de voorafgaande schakeling. Daarom is het vaak nodig de waarde van de R_i te kennen. Het meten van de ingangsweerstand kan evenwel praktische moeilijkheden geven, vooral als de R_i groot is. We kunnen de R_i bepalen door op de ingang van de versterker een wisselspanning aan te sluiten (zie figuur). We meten de u_i en de i_i en delen de meetresultaten op elkaar.

$$R_i = \frac{u_i}{i_i}$$



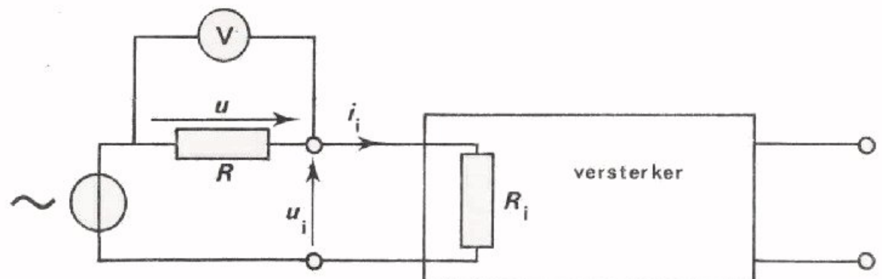
Het meten van u_i levert gewoonlijk geen moeilijkheden op. U_{it} is bijv. 10 mV. Zo'n spanning kan gemakkelijk m.b.v. een oscilloscoop worden gemeten. Het meten van i_i, geeft echter wel problemen als R_i groot is. Is bijv. R_i = 1 MΩ dan is bij U_{it} = 10 mV de i_i gelijk aan:

$$I_{it} = \frac{U_{it}}{R_i} = \frac{10.10^{-3}}{10^6} = 10^{-8}\ \text{A} = 0{,}01\ \mu\text{A}.$$

We hebben geen wisselstroommeters om zo'n kleine stroom te meten.

Een andere methode om i_i te meten is die waarbij een *bekende* weerstand in serie met de ingang wordt geschakeld (zie figuur). We meten dan de *spanning* u over deze R en berekenen daarna $i_i = u/R$.

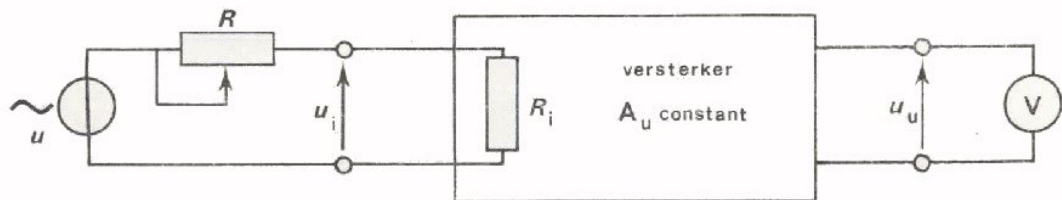
$$R_i = \frac{u_i}{u/R}$$



In geval van een grote R_i geeft deze methode toch weer moeilijkheden. Kiezen we R groot (bijv. 1 MΩ), dan maken we al gauw een flinke meetfout doordat de R_i van de voltmeter parallel aan de R komt te staan. Kiezen we R klein (bijv. 100Ω), dan wordt de spanning u te klein om goed gemeten te kunnen worden. Een oplossing voor al deze problemen biedt de meetmethode die op het volgende blad wordt behandeld.

HET METEN VAN DE INGANGSWEERSTAND MET BEHULP VAN EEN VARIABELE WEERSTAND

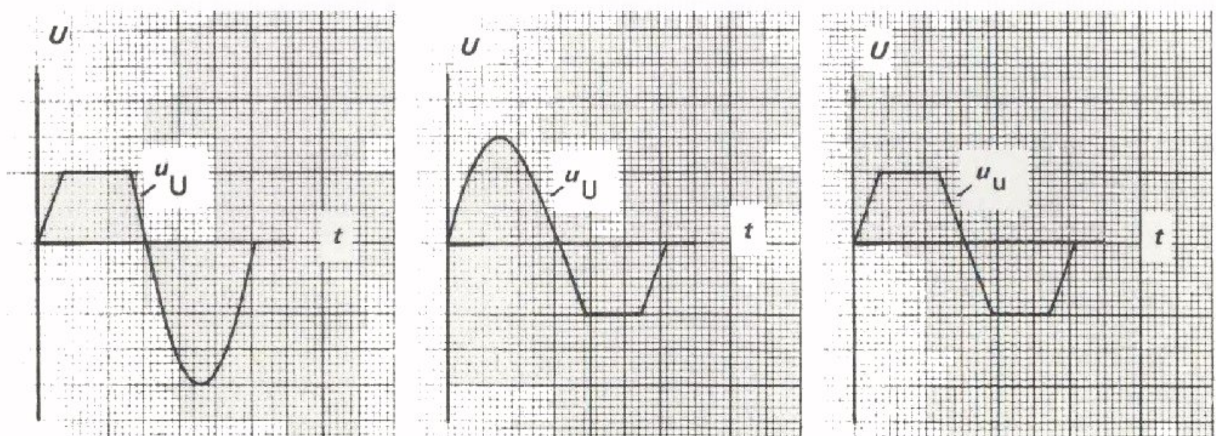
We plaatsen een variabele weerstand R in serie met de versterkersingang volgens onderstaand schema.



We beginnen met R kort te sluiten, zodat $u_i = u$. We meten de uitgangsspanning U_u en stellen de grootte van u zo in, dat U_u een goed afleesbare waarde heeft (bijv. 1 V).
Daarna verwijderen we de kortsluiting en stellen R zo in, dat U_u tot op de helft is gezakt (dus tot 0,5 V).
Omdat A_u *constant is*, zal u_i dan óók tweemaal zo klein zijn geworden. Dit laatste betekent dat de helft van u over R_i staat en de andere helft over R. Dus $R_i = R$.
We kunnen tenslotte R losnemen en zijn waarde met een ohmmeter bepalen.

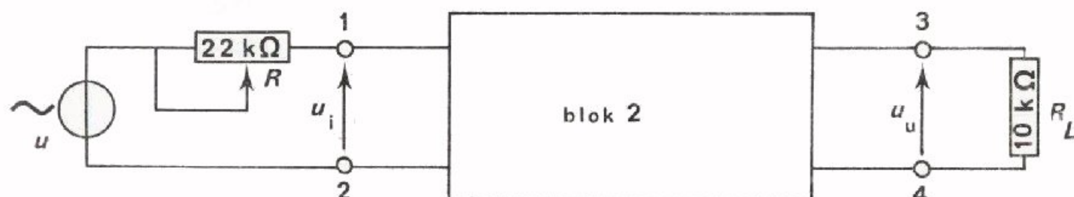
HET VOORKOMEN VAN MEETFOUTEN

Bij metingen aan een versterker moet men er altijd voor zorgen dat de versterker een onvervormd uitgangssignaal geeft. In dit verband is het raadzaam een oscilloscoop op de uitgang van de versterker aan te sluiten.
Als het verloop van de uitgangsspanning zichtbaar afwijkt van de sinusvorm moet men, om meetfouten te voorkomen, het ingangssignaal *kleiner* maken.
Als de uitgangsspanning verloopt zoals hieronder is weergegeven, dan is de ingangsspanning van de versterker véél te groot.



OPDRACHT: HET METEN VAN DE INGANGSWEERSTAND

- We gaan verder met metingen aan de reeds op Uw paneel aangebrachte versterker.



- Breid de schakeling uit zoals bovenstaand is weergegeven.
- Schakel de voedingsspanning van 12 V in.
- Maak de frequentie van de spanning u 1kHz en sluit de weerstand R kort. Stel de amplitude van u zo in, dat de uitgangsspanning u_u niet afwijkt van de sinusvorm. Controleer dit m.b.v. een oscilloscoop.

- Bepaald de ingangsweerstand van blok 2 op een wijze zoals op blad C04.13 is behandeld.

R_i = [kΩ]

- Maak de ingangsspanning zo groot dat de uitgangsspanning aan één zijde wordt "afgeplat". Dit gebeurt bij een ingangsspanning van

U_{it} = [V]

- Verhoog de ingangsspanning nogmaals zodat de uitgangsspanning aan twéé zijden afplattingen vertoont. Dit gebeurt bij een ingangsspanning van

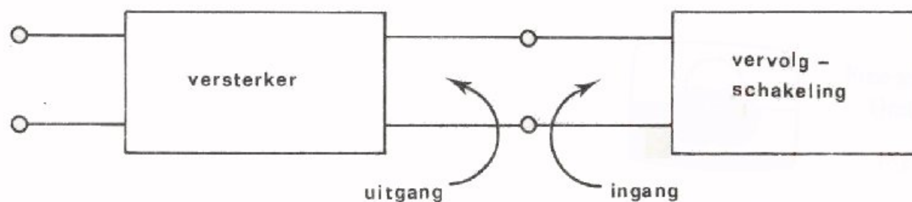
U_{it} = [V]

Schakel de voeding en de LF-generator uit. Breek de schakeling nog niet af.

UITGANGSEIGENSCHAPPEN VAN EEN VERSTERKER

In de praktijk wordt de uitgang van een versterker aangesloten op de ingang van een volgende schakeling die het signaal van de versterker verder verwerkt (zie de figuur). In dit verband zijn de volgende versterkereigenschappen van belang.

- *De maximaal mogelijke waarden van de uitgangsstroom, de uitgangsspanning en het uitgangsvermogen.* Voor het uitsturen van de vervolgschakeling is de beschikbare stroom, spanning en vermogen beperkt tot genoemde maximumwaarden.
- *De grootte van de uitgangsweerstand.* De uitgang van de versterker wordt namelijk belast met de ingang van de vervolgschakeling.



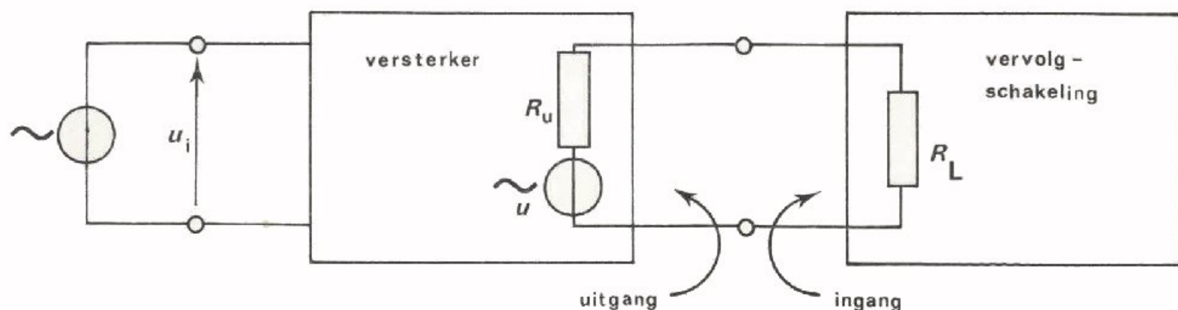
HET MAXIMAAL AF TE GEVEN UITGANGSSIGNAAL

Het maximaal af te nemen vermogen is, zoals eerder besproken, kleiner dan het vermogen dat de voeding aan de versterker toevoert.

De maximaal af te nemen wisselstroom en de maximaal af te nemen wisselspanning hangen af van de grootte van resp. de gelijkstroom en de gelijkspanning die de voeding aan de versterker levert. Hierop komen we in de volgende les terug.

DE UITGANGSWEERSTAND VAN EEN VERSTERKER

De uitgang van een versterker kan men "zien" als een spanningsbron met een emk u in serie met een uitgangsweerstand R_u. Dit circuit wordt belast door de ingang van de vervolgschakeling die als een belastingsweerstand (R_L) kan worden beschouwd.



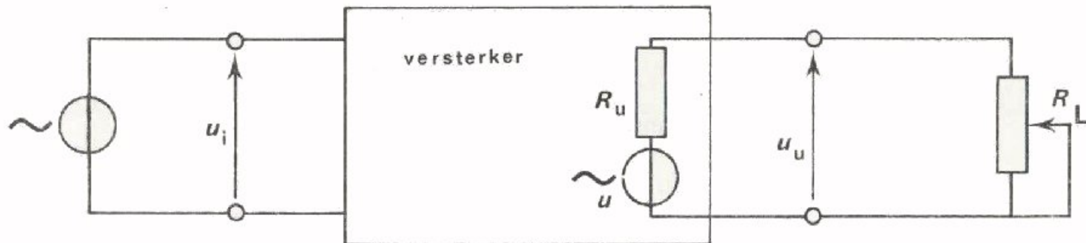
OEFENING

Bij een niet-belaste versterker is de uitgangsspanning 3 V; de uitgangsweerstand R_u = 1 kΩ.
Hoeveel stroom, spanning en vermogen levert de versterker als deze wordt belast met een vervolgschakeling waarvan R_L = 2 kΩ?

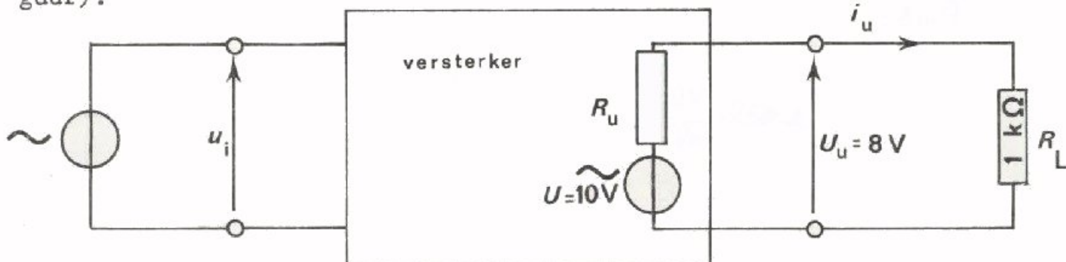
I_{eff} = [mA] U_{eff} = [V] P = [mW]

HOE METEN WE DE UITGANGSWEERSTAND ?

Uit het voorgaande is gebleken dat het belangrijk kan zijn de waarde van de R_u van een versterker te kennen. Bij de meeste versterkers kan de R_u op eenvoudige wijze als volgt worden bepaald. Aan de ingang wordt een spanning u_i aangesloten. Dan wordt eerst de uitgangsspanning zonder belasting gemeten. Dat is de waarde van u in onderstaand schema. Daarna wordt R_L aangesloten en zó geregeld dat u_u de helft wordt van u . In dat geval is $R_L = R_u$. Door R_L m.b.v. een ohmmeter te meten is de waarde van R_u bekend.



Praktisch is het niet altijd toelaatbaar om een versterker te belasten met een R_L die gelijk is aan R_u. Bij sommige versterkers ontstaat namelijk een vervormd uitgangssignaal bij belasting met een te lage weerstand. Hoe dán de R_u meten? We laten dit zien aan de hand van een voorbeeld (zie figuur).



We gaan weer eerst de open uitgangsspanning u meten. Stel dat U_{eff} 10 V is. Vervolgens belasten we de versterker met een toelaatbare weerstand R_L en meten de klemspanning U_u. Stel dat R_L = 1 kΩ en de gemeten U_u 8 V bedraagt.

De R_u-waarde is dan als volgt te berekenen

Uit $U_{u(eff)}$ = 8 V en R_L = 1 kΩ volgt:

$$I_{u(eff)} = \frac{U_{u(eff)}}{R_L} = \frac{8}{1000} = 8.10^{-3} \text{ A.}$$

Verder is de spanning over R_u: $U_{ru(eff)} = U_{eff} - U_{u(eff)} = 10 - 8 = 2$ V.

Tenslotte is: $$R_u = \frac{U_{ru(eff)}}{I_{u(eff)}} = \frac{2}{8.10^{-3}} = 250\ \Omega$$

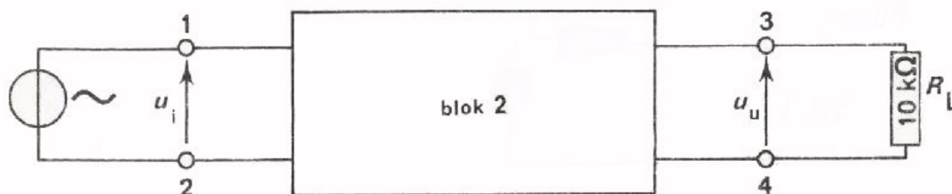
OEFENING

De uitgangsspanning van een versterker daalt bij belasting met R_L = 150 Ω van 1 V tot 0,6 V.

De uitgangsweerstand is R_u = [   ] Ω

OPDRACHT: HET METEN VAN DE UITGANGSWEERSTAND

- We gaan de laatste metingen verrichten aan de reeds op Uw paneel aangebrachte versterker. Breng de schakeling in onderstaande toestand.



- Schakel de voedingsspanning van 12 V in.

- Maak de frequentie van de ingangsspanning u_i 1 kHz en stel de amplitude in op ca. 0,2 V

- Meet achtereenvolgens de uitgangsspanning u_u bij open uitgang en bij een belasting van 10 kΩ. Bereken uit de meetresultaten de uitgangsweerstand van blok 2.

U_{ut} (onbelast) = [V]

U_{ut} (belast) = [V]

R_u = [Ω]

- Bepaal nogmaals de uitgangsweerstand van blok 2, maar nu met behulp van een variabele weerstand (22 kΩ), waarmee de uitgangsspanning tot op de helft wordt verminderd. Overtuig U dat de uitgangsspanning onvervormd is.

R_u = [Ω]

- Bij een verschil van meer dan 20% tussen beide R_u-waarden hebt U kennelijk ergens een fout gemaakt. In dit geval dient U de metingen (en berekeningen) opnieuw uit te voeren. Als ook dan de meetresultaten te ver uit elkaar liggen, raadpleeg de docent hierover.

  Dit was de laatste opdracht van deze les. U kunt de meetopstelling afbreken.

SAMENVATTING

- We zeggen dat een elektrisch signaal versterkt wordt als:
  - er vermogensversterking optreedt;
  - het uitgangssignaal de zelfde vorm en frequentie heeft als het ingangs-signaal.

- In de praktijk wordt de versterkeringang op een signaalbron aangesloten. De uitgang wordt verbonden met een belasting.



- In geval van *vermogens*versterking heeft men, behalve passieve componenten, in ieder geval ook actieve componenten nodig.

- Het af te nemen vermogen van een versterker is altijd kleiner dan het vermogen dat de voeding eraan toevoert.

- De vermogensversterking wordt vaak uitgedrukt in bel(B) of in decibel(dB).

  A_P = 3 B wil zeggen: $A_P = 10^3 = 1000$

  A_P = 40dB wil zeggen: $A_P = \frac{40}{10} = 4$ B of $A_P = 10^4 = 10\ 000$

  A_P = 47dB wil zeggen: A_P ligt tussen 10 000 en 100 000 in.

  A_P = 3dB wil zeggen: $A_P = 2$

- Bij in serie geschakelde versterkertrappen berekent men de totale vermogensversterking door:
  - de verhoudingsgetallen (P_u/P_i) van de afzonderlijke trappen met elkaar te *vermenigvuldigen*.
  - de dB's waarin P_u/P_i van de afzonderlijke trappen zijn uitgedrukt, *op te tellen*.

- De belangrijkste overdrachtseigenschappen van een versterker zijn:
  - de stroomversterking
  - de spanningsversterking
  - de vermogensversterking

De belangrijkste ingangseigenschappen zijn:

- de ingangsweerstand
- de maximaal toelaatbare ingangsstroom en -spanning en met maximaal toelaatbare ingangsvermogen.

De belangrijkste uitgangseigenschappen zijn:

- de uitgangsweerstand
- de maximaal mogelijke onvervormde uitgangsstroom en -spanning en het maximaal afgegeven vermogen.

NAAM: [ ] KLAS: [ ]

OEFENINGEN

1. De R_u van een versterker is 20Ω.
   In onbelaste toestand is de uitgangsspanning van de versterker $U_{u(eff)}$ = 10 V.
   Bij belasting met een weerstand R_L daalt $U_{u(eff)}$ tot 9 V.

   - Hoe groot is R_L? R_L = [ ] Ω

   - Hoe groot is de uitgangsspanning van de versterker bij een belasting van 80 Ω? $U_{u(eff)}$ = [ ] V

2. Van een versterker is gegeven:
   De maximaal toelaatbare ingangsspanning is 10 mV.
   De ingangsweerstand is R_i = 1 kΩ
   De spanningsversterking A_u = 10 000
   De vermogensversterking A_p = 70 dB

   Bereken uit deze gegevens:

   - de maximaal toelaatbare ingangsstroom I_{it} = [ ] µA

   - de maximale uitgangsspanning U_{ut} = [ ] V

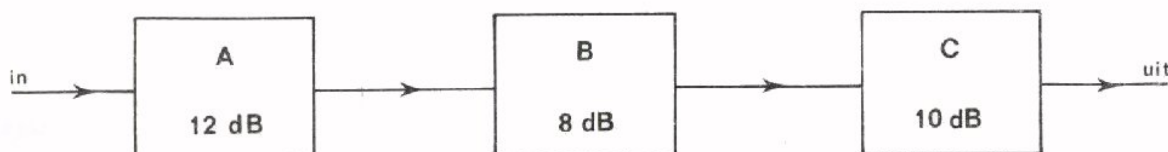
   - de stroomversterking A_i = [ ]

   - het maximale ingangsvermogen P_{imax} = [ ] µW

   - het maximale uitgangsvermogen P_{umax} = [ ] W

   Hoe groot is P_u als U_{it} = 0,5 U_{it}? P_u = [ ] W

3. Drie versterkertrappen A, B en C zijn achter elkaar geschakeld.
De vermogensversterking van trap A is 12 dB, die van trap B is 8 dB en die van C is 10 dB.



- Hoeveel dB is de totale vermogensversterking ?

A_p = [dB]

- Hoe groot is het uitgangsvermogen van trap B als aan de ingang van trap A een vermogen van 10 µW wordt toegevoerd ?

P_u = [mW]

- De vermogensversterking van trap A is:

0 10
0 100
0 16
0 5

Eén van deze antwoorden is juist.

4. Een signaalbron met een emk van 10 V en een uitgangsweerstand van 600 Ω wordt aangesloten op de ingang van de versterker. De ingangsspanning van de versterker is dan $U_{i(eff)}$ = 7 V.

- Hoe groot is de ingangsweerstand van de versterker ?

R_i = [Ω]

- Hoe groot is de ingangsstroom ? $I_{i(eff)}$ = [mA]

- Hoeveel vermogen wordt er aan de versterker toegevoerd?

P_i = [mW]

C 5

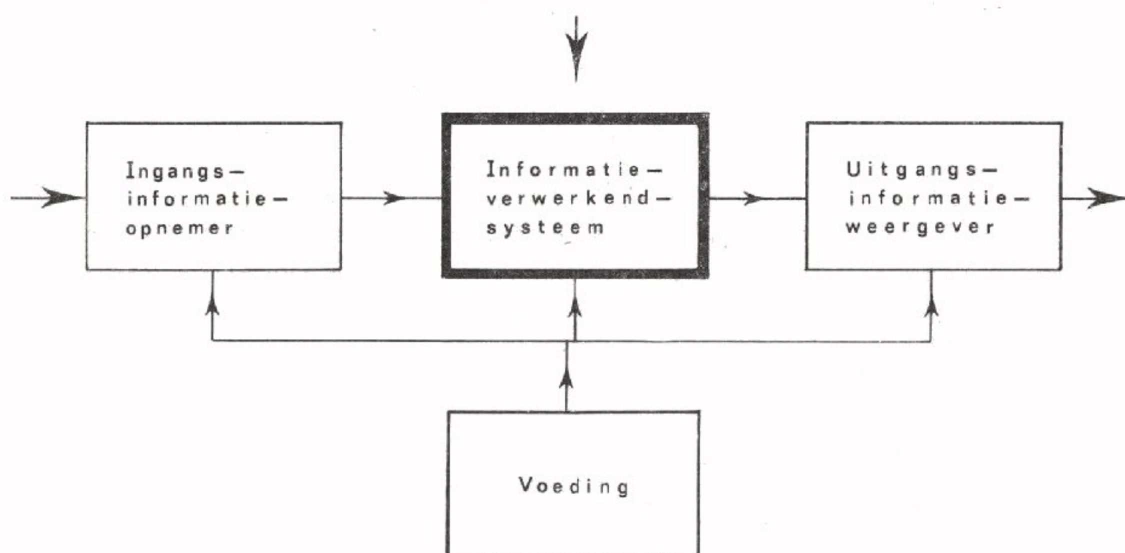
VERSTERKERSCHAKELINGEN II
HET INWENDIGE VAN EEN VERSTERKER

DE BELANGRIJKSTE PUNTEN UIT DE VORIGE LES

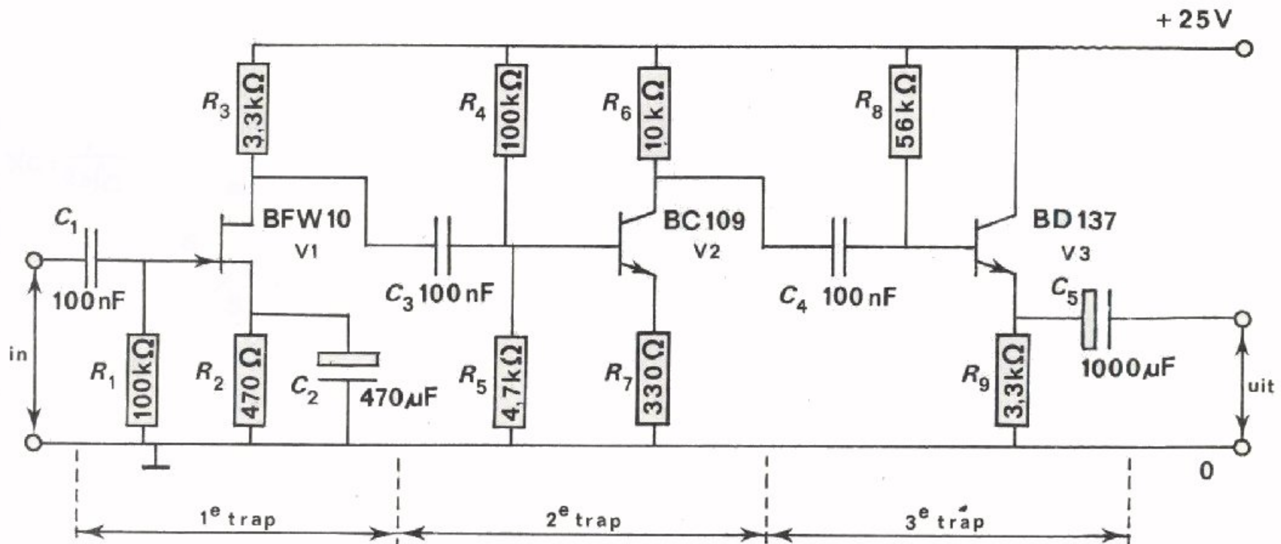
- We hebben de functie *versterken* vastgelegd.
  We spreken van versterken van een elektrisch signaal als:
  - er vermogensversterking optreedt, en
  - het uitgangssignaal dezelfde vorm en frequentie heeft als het ingangssignaal.
- De volgende *uitwendige* eigenschappen van versterkers zijn aan de orde geweest:
  - de ingangseigenschappen,
  - de uitgangseigenschappen,
  - de overdrachtseigenschappen.
- De belangrijkste ingangseigenschappen zijn:
  - de ingangsweerstand,
  - de maximaal toelaatbare ingangsstroom en ingangsspanning en het maximaal toelaatbare ingangsvermogen.
- De belangrijkste uitgangseigenschappen zijn:
  - de uitgangsweerstand,
  - de maximaal mogelijke uitgangsstroom en uitgangsspanning en het maximaal af te nemen uitgangsvermogen.
- De belangrijkste overdrachtseigenschappen zijn:
  - de vermogensversterking,
  - de spanningsversterking,
  - de stroomversterking.

WAAROVER DEZE LES HANDELT

In deze les gaan we nader in op het *inwendige* van een versterker. Van deze versterker gaan we een aantal van bovengenoemde eigenschappen wat meer in detail bekijken. We zullen zien waar de eigenschappen in hoofdzaak van afhangen. Onderstaande figuur geeft aan met welk deel van het analoog systeem we bezig zijn.



VOORBEELD VAN EEN VERSTERKER



Als voorbeeld van een versterker hebben we een drietraps-versterker gekozen. De trappen zijn onderling zeer verschillend.

- De 1e trap is uitgevoerd met een BFW10.

  Welk type is dit ? V_1 is een [ ] - transistor.

  De ingang van de versterker ligt via C_1 aan de [ ] van V_1.

  De uitgangsspanning van de 1e trap ontstaat aan de [ ] van V_1.

  De 1e trap noemt men een gemeenschappelijk [ ] - schakeling.

- In de 2de trap wordt een BC109 gebruikt.

  De pijlrichting geeft aan dat V_2 een **PNP/NPN** - transistor is.

  De "B" van BC109 geeft aan dat V_2 een **silicium/germanium** transistor is.

  De betekenis van "C" is [ ]

- In de laatste trap is een BD137 toegepast.

  De "D" van BD137 betekent dat V_3 bedoelt is voor [ ]

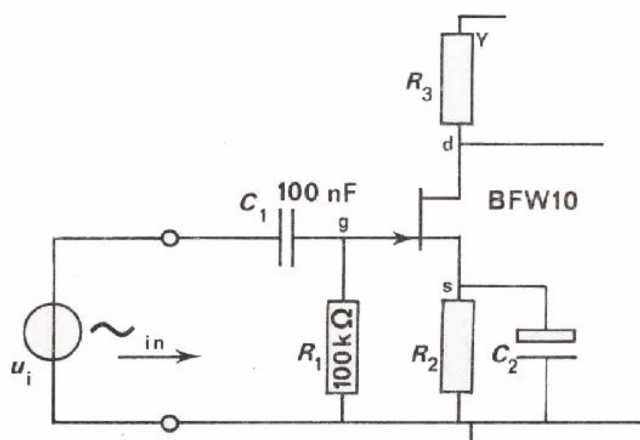
  De uitgang van de 2e trap is verbonden met de [ ] van V_3.

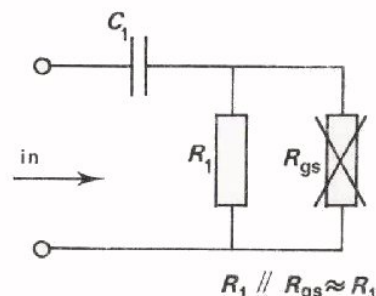
  De uitgang van de versterker ligt via C_5 aan de [ ] van V_3.

  De 3e trap noemt men een gemeenschappelijk [ ] - schakeling.

DE INGANGSEIGENSCHAPPEN VAN DE VERSTERKER

De ingangseigenschappen van de versterker worden in hoofdzaak bepaald door het ingangscircuit van de le trap.





DE INGANGSWEERSTAND

Van een FET is bekend dat de eigen weerstand tussen de gate en de source zeer groot is. Die van de BFW10 is enkele tientallen MΩ. De ingangsimpedantie wordt dus in hoofdzaak bepaald door C_1 in serie met R_1 (zie figuur). De condensator C_1 heeft men zo groot gekozen dat bij de *laagste frequenties* van de te versterken wisselspanningen de spanning over C_1 te verwaarlozen klein is t.o.v. die over R_1. Reken eens uit hoe groot de reactantie van C_1 is bij een frequentie van 10 kHz.

$$X_{C1} = \frac{1}{\dots\dots\dots\dots\dots} \approx \boxed{\quad\quad \Omega}$$

Bij 10 kHz is X_{C1} dus veel kleiner dan R_1. Bij deze en hogere frequenties is de ingangsweerstand dus praktisch gelijk aan R_1 = 100 kΩ.

HET INGANGSVERMOGEN

Een grote ingangsweerstand heeft het voordeel dat de ingangs-signaalbron slechts weinig vermogen behoeft af te geven. Bij een ingangsspanning van 10 mV is het ingangsvermogen in ons voorbeeld:

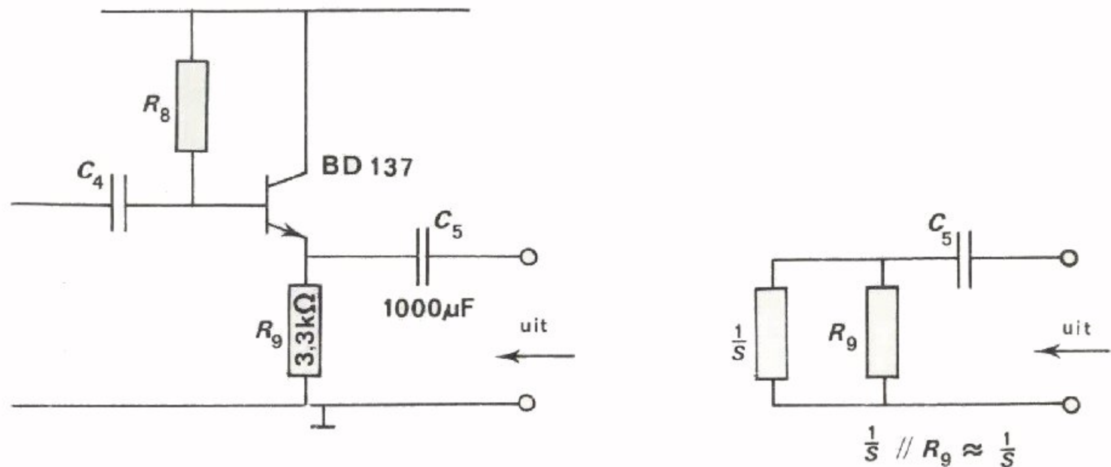
$$P_i = \boxed{\quad\quad \mu W}$$

DE MAXIMAAL TOELAATBARE INGANGSSPANNING

De negatieve spanning tussen gate en source van de BFW10 mag volgens de voorschriften niet groter zijn dan 30 V. Boven deze waarde kan doorslag van de sperlaag tussen gate en source optreden, waardoor de FET defect raakt. Als we aannemen dat de negatieve voorspanning op de gate 2 volt is, dan mag de topwaarde van de ingangs-wisselspanning om bovenstaande reden niet groter worden dan 28 volt.

DE UITGANGSEIGENSCHAPPEN VAN EEN VERSTERKER

De uitgangseigenschappen van een versterker worden nagenoeg uitsluitend bepaald door de laatste trap.



DE UITGANGSWEERSTAND

De laatste trap van de versterker is uitgevoerd als geaarde collector-schakeling of emittervolger. Van zo'n schakeling is bekend dat de uitgangsweerstand klein is en gelijk aan $1/S$ parallel aan de emitterweerstand. Hierbij is S de steilheid van de transistor bij de optredende gelijkstroominstelling. Daar in ons voorbeeld R_9 zeer groot is t.o.v. $1/S$, wordt de uitgangsimpedantie in hoofdzaak bepaald door C_5 in serie met $1/S$ (zie figuur). Bij de gegeven schakeling is van de BD137 $S \simeq 5$ mA/V.

$$\frac{1}{S} \simeq \boxed{\quad\quad\quad \Omega}$$

Reken eens uit hoe groot de reactantie van C_5 is bij een frequentie van 10 kHz.

$$X_{C5} = \frac{1}{\dots\dots\dots\dots\dots} \simeq \boxed{\quad\quad\quad \Omega}$$

Bij 10 kHz is X_{C5} dus veel kleiner dan $1/S$. Bij deze en hogere frequenties is de uitgangsweerstand dus praktisch gelijk aan $R_u \simeq 1/S \simeq 200\Omega$.
De kleine uitgangsweerstand heeft als voordeel dat de uitgang met een betrekkelijk kleine weerstand belast kan worden zonder dat de afgegeven wisselspanning te veel afneemt.
Bij een belasting $R_1 = 1{,}8$ kΩ zakt de uitgangsspanning slechts $\boxed{\quad\quad \%}$

DE MAXIMAAL MOGELIJKE UITGANGSSTROOM EN UITGANGSSPANNING EN HET MAXIMAAL AF TE NEMEN UITGANGSVERMOGEN

De maximaal mogelijke uitgangs-wisselstroom en uitgangs-wisselspanning worden bepaald door de instelstroom I_C van de BD137 en de voedingsspanning U_B. Veronderstel dat I_C zo gekozen is dat over emitterweerstand R_E de halve voedingsspanning (12½ V) valt (zie figuur a). We kunnen nu de basis sturen met een sinusvormig signaal, zodanig dat tijdens de positieve top van de sinusspanning de transistor helemaal open staat en tijdens de negatieve top de transistor nog juist geen stroom voert. In het 1e geval hebben we een situatie zoals in fig. b is aangegeven. In het 2e geval is de toestand zoals fig. c weergeeft.

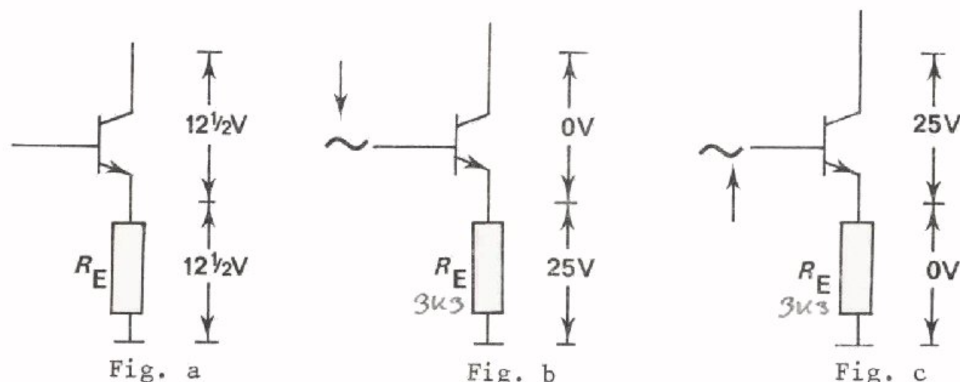


Fig. a Fig. b Fig. c

- De *wisselspanning* over R_E is dus maximaal 12½ volt (topwaarde); d.i. $\frac{12\frac{1}{2}}{\sqrt{2}}$ volt (effectieve waarde).

- De *wisselstroom* door R_E is dus maximaal $\frac{12\frac{1}{2}}{3k3} \approx 4$ mA(topwaarde); d.i. $\frac{4}{\sqrt{2}}$ mA (effectieve waarde).

- Het *wisselstroomvermogen* in R_E is dus hoogstens

$P_{u(max)}$ = [mW]

- Het door de batterij geleverde *gelijkstroomvermogen* is

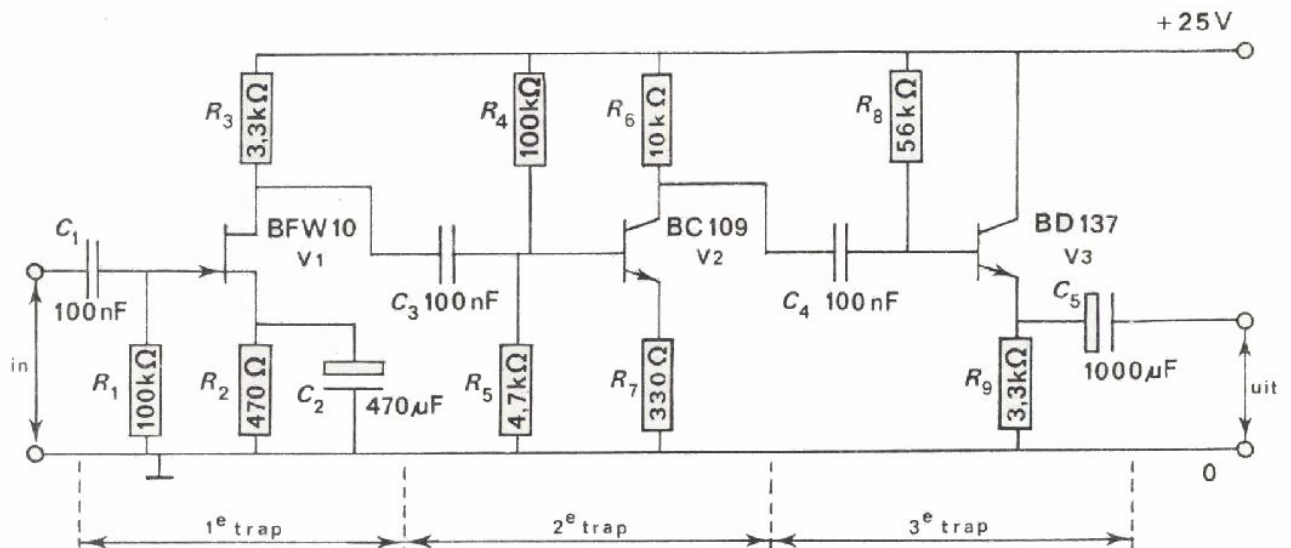
P_u = [mW]

OPMERKINGEN

- Een transistor kan men niet helemaal van 0 V tot aan de voedingsspanning uitsturen. De maximum waarde zijn in de praktijk daarom iets kleiner dan de hierboven berekende waarden.
- Bovenstaand verhaal geldt alleen bij een *onbelaste* uitgang. Het voert hier te ver de situatie bij een belaste versterker te behandelen. Wel dient opgemerkt te worden dat het maximale wisselstroomvermogen in een eventuele belastingweerstand aanzienlijk kleiner is dan de $P_{u(max)}$ die hierboven berekend is.

DE OVERDRACHTSEIGENSCHAPPEN VAN DE VERSTERKER

De overdrachtseigenschappen worden bepaald door de totale opbouw van de schakeling en de componenten die hierbij worden gebruikt.



DE SPANNINGSVERSTERKING BIJ 10 kHZ

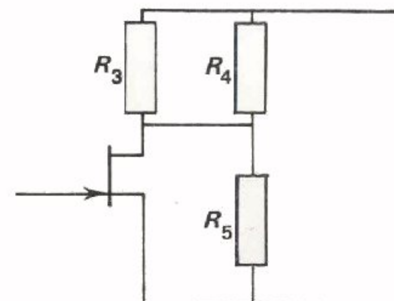
De grootte van de spanningsversterking A_u is niet bij alle frequenties dezelfde. Dit is te wijten aan de aanwezigheid van capaciteiten in de versterker. Bij de eerder genoemde frequentie van 10 kHz zijn de capaciteiten te verwaarlozen. Daarom gaan we nu eerst na hoe groot de versterking bij 10 kHz is.

De spanningsversterking van de 1e trap.

Van de 1e trap is de spanningsversterking $A_{u1} = S.R_d$. Hierin is S de steilheid van de FET en R_d de totale weerstand tussen de drain en aarde.

$R_d = R_3 \;//\; R_4 \;//\; R_5$ (zie figuur).

(Hierbij is de ingangsweerstand tussen basis en aarde van de 2e trap verwaarloosd).



$S \simeq 3$ mA/V bij de optredende gelijkstroominstelling van de BFW10.

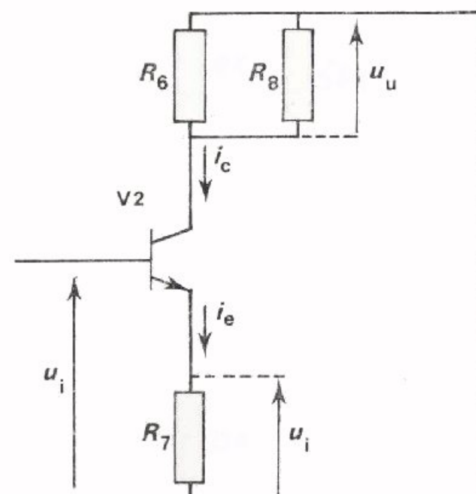
Hieruit volgt: $A_{u1} \simeq$ [ ]

De uitgangsspanning is in **fase/tegenfase** met de ingangsspanning.

Als men de 2e versterkertrap bij C_3 los maakt wordt de spanningsversterking van de 1e trap **groter/kleiner**

DE SPANNINGSVERSTERKING BIJ 10 kHZ (vervolg van pagina C05.7)

- De spanningsversterking van de 2de trap. De aan de 2e trap toegevoerde wisselspanning u_i komt bijna geheel over de emitterweerstand R_7 te staan. De wisselspanning tussen basis en emitter is gering (zie figuur).



Dus $i_e \simeq \frac{u_i}{R_7}$

Verder is $u_u = i_c\ (R_6//R_8)$

Daar $i_c \simeq i_e$, wordt:

$$u_u \simeq \frac{u_i}{R_7}\ (R_6//R_8)$$

De ingangsweerstand van de 3e trap tussen basis en aarde is verwaarloosd.

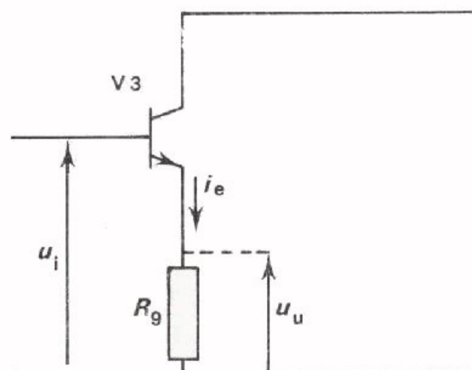
De spanningsversterking van de 2e trap is dus

$$A_{u2} = \frac{u_u}{u_i} \simeq \frac{R_{6}//R_8}{R_7}$$

In ons voorbeeld is $A_{u2} \simeq$ [ ]

De uitgangsspanning is in **fase/tegenfase** met de ingangsspanning.

- De spanningsversterking van de 3e trap. Evenals bij de 2e trap komt de toegevoerde ingangsspanning u_i bijna geheel over de emitterweerstand R_9 te staan (zie figuur).



Dus $u_{R9} = u_u \simeq u_i$

De spanningsversterking is dan:

$A_{u3} = \frac{u_u}{u_i} \simeq$ [ ]

De uitgangsspanning is in

fase/tegenfase met de ingangsspanning.

- De spanningsversterking van het geheel.
  De gehele versterker heeft een spanningsversterking A_u = [ ]

  De uitgangsspanning van de versterker is in **fase/tegenfase** met de ingangsspanning.

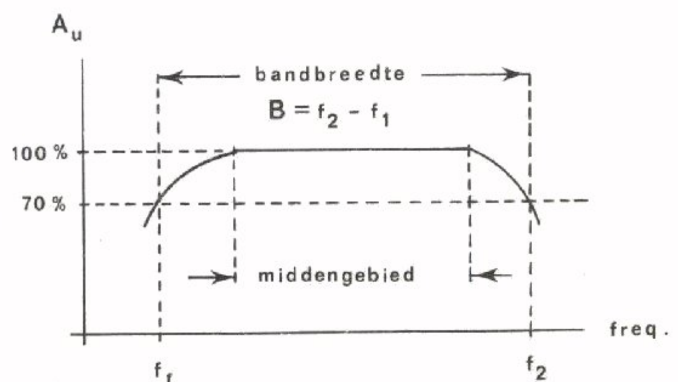
  Dit alles geldt bij f = 10 kHz, een frequentie waarbij de condensator in de versterker als kortsluitingen kunnen worden beschouwd.

DE SPANNINGSVERSTERKING BIJ LAGE- EN HOGE FREQUENTIES

De versterking zoals deze in het voorgaande is berekend, geldt alleen voor frequenties waarbij de aanwezige capaciteiten niet van invloed zijn. We hebben steeds verondersteld dat dit bij f = 10 kHz het geval was. In een nog volgende opdracht gaat U dit zelf meten. Ook gaat U meten welke capaciteiten van invloed zijn op de versterking bij lage frequenties en welke bij hoge frequenties. De verklaring volgt na het meten.

Het is gebruikelijk om de spanningsversterking A_u (= u_u/u_i) bij uiteenlopende frequenties in een grafiek uit te zetten. Deze noemt men de *amplitude-frequentie-karakteristiek.* (Een betere benaming zou zijn: Versterking-frequentie-karakteristiek. Waarom het woord "versterking" vervangen wordt door "amplitude" zal blijken bij de metingen op de volgende pagina's).

Hiernaast is een voorbeeld van een amplitude-frequentie-karakteristiek getekend. U ziet dat A_u bij zowel lage als hoge frequenties afneemt. Dit gaat U straks zelf ervaren.



Om de grootte aan te geven van het frequentiegebied dat door de versterker redelijk goed wordt versterkt, heeft men het begrip *bandbreedte* ingevoerd. De bandbreedte is het verschil tussen de frequenties f_1 en f_2, waarbij de spanningsversterking gedaald is tot 70% van de A_u in het middengebied (zie figuur). Het "middengebied" is het frequentiegebied waarbij de capaciteiten van de versterker niet van invloed zijn. In dit gebied geldt de op de vorige pagina berekende A_u. Soms wordt "de bandbreedte" op een andere manier uitgedrukt. Men zegt dan: de bandbreedte is het verschil tussen de frequenties f_1 en f_2, waarbij de *vermogensversterking* een factor 2 of 3 dB gedaald is t.o.v. de vermogensversterking in het middengebied. Dat deze definitie overeenkomt met de vorige zal uit het volgende getallenvoorbeeld blijken.

Stel dat in het middengebied bij een ingangsvermogen P_i = 10 mW de uitgangsspanning U_u = 10 V over een belastingsweerstand R_l = 1 kΩ.

De vermogensversterking is dan: $A_p(\text{midden}) = \dfrac{U^2_{u(eff)}/R_l}{P_i} = 10.$

Stel verder dat in het laag-frequentie-gebied bij dezelfde P_i en R_l de uitgangsspanning 30% lager is; dus U_u = 7 V.

De vermogensversterking is dan: $A_p(\text{laag}) = \dfrac{7^2/R_1}{10.10^{-3}} = 5$

Een 30% lagere uitgangsspanning komt dus overeen met een factor 2 minder vermogensversterking. In de vorige les hebben we geleerd dat een $A_p = 2$ gelijk is aan 3 dB. Een 30% lagere uitgangsspanning komt dus ook overeen met 3 dB minder uitgangsvermogen.

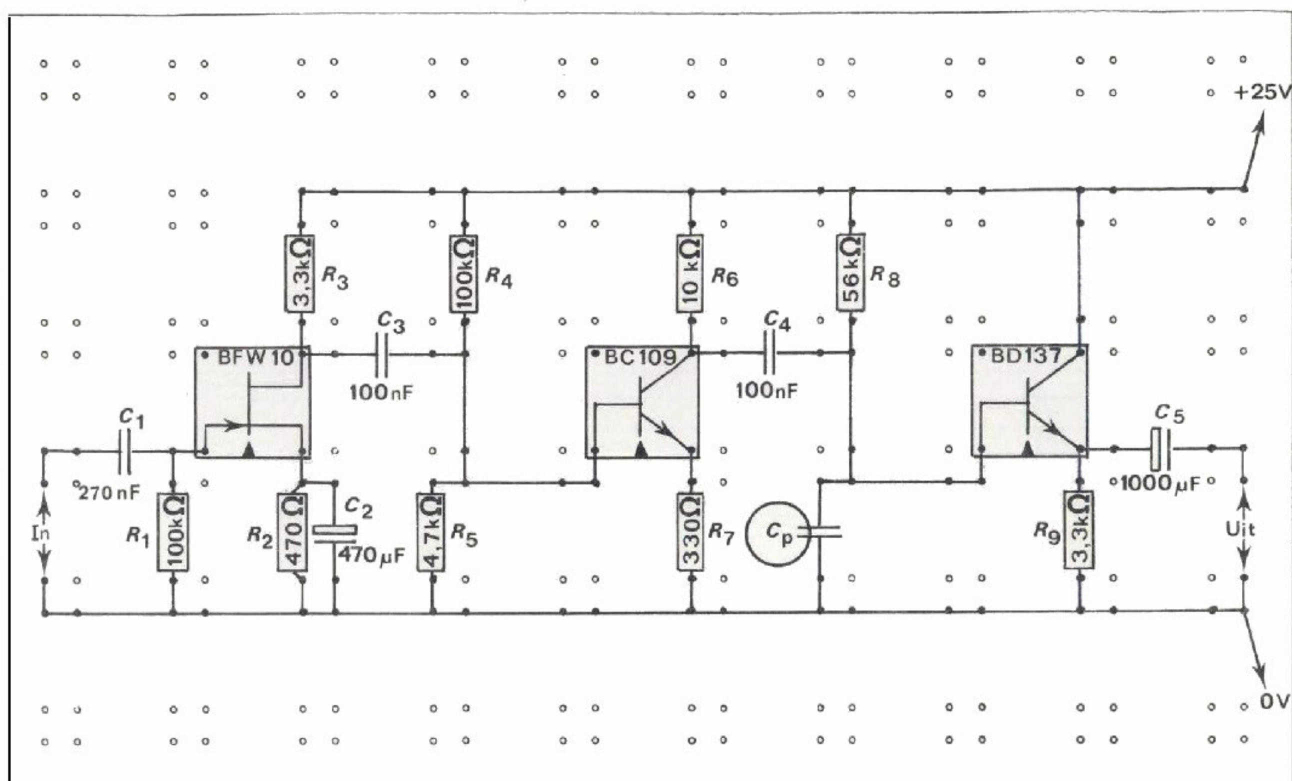
OPDRACHT: HET METEN VAN DE AMPLITUDE-FREQUENTIE-KARAKTERISTIEK

We gaan nu meten aan een versterker die, met uitzondering van de condensator C_p = 220 pF, overeenkomt met die in de rekenvoorbeelden. C_p is met opzet in de schakeling opgenomen om de versterking bij de hoge frequenties extra te verminderen. Bij een van de volgende metingen zullen we C_p wegnemen en kunnen dan constateren welke invloed deze condensator op de amplitude-frequentie-karakteristiek heeft.

Bij het opnemen van de amplitude-frequentie-karakteristiek gaan we als volgt te werk. De wisselspanning die aan de versterker wordt toegevoerd houden we bij de verschillende frequenties op een constante waarde. We meten hierbij de uitgangsspanning. Het verloop van de *amplitude* van de uitgangsspanning bij uiteenlopende *frequenties* komt overeen met de *amplitude-frequentie*-karakteristiek van de versterker. Het is U nu waarschijnlijk duidelijker waarom deze karakteristiek zo genoemd wordt.

- Bouw de versterker op Uw paneel zoals op blad C05.11 is weergegeven.
- Sluit een voedingsspanning van 25 V aan.
- Sluit een sinusvormige spanning met een frequentie van 10 kHz aan tussen de ingangsklemmen. Regel de generatorspanning tot de uitgangsspanning van de versterker een waarde heeft van 6 V (top-top). Meet dit m.b.v. een oscilloscoop; gebruik een afgeschermde meetkabel.
- Meet de uitgangsspanning van de versterker bij ondervermelde frequenties. Let erop dat de ingangsspanning van de generator bij de diverse frequentie instellingen constant blijft.
- Vul de volgende tabel in.

f	100 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	10 kHz	50 kHz	100 kHz	150 kHz
$2\,U_t$								



- Zet de meetresultaten uit op het grafiekenpapier van pag. C05.12. Verbind de meetpunten door een vloeiende lijn.

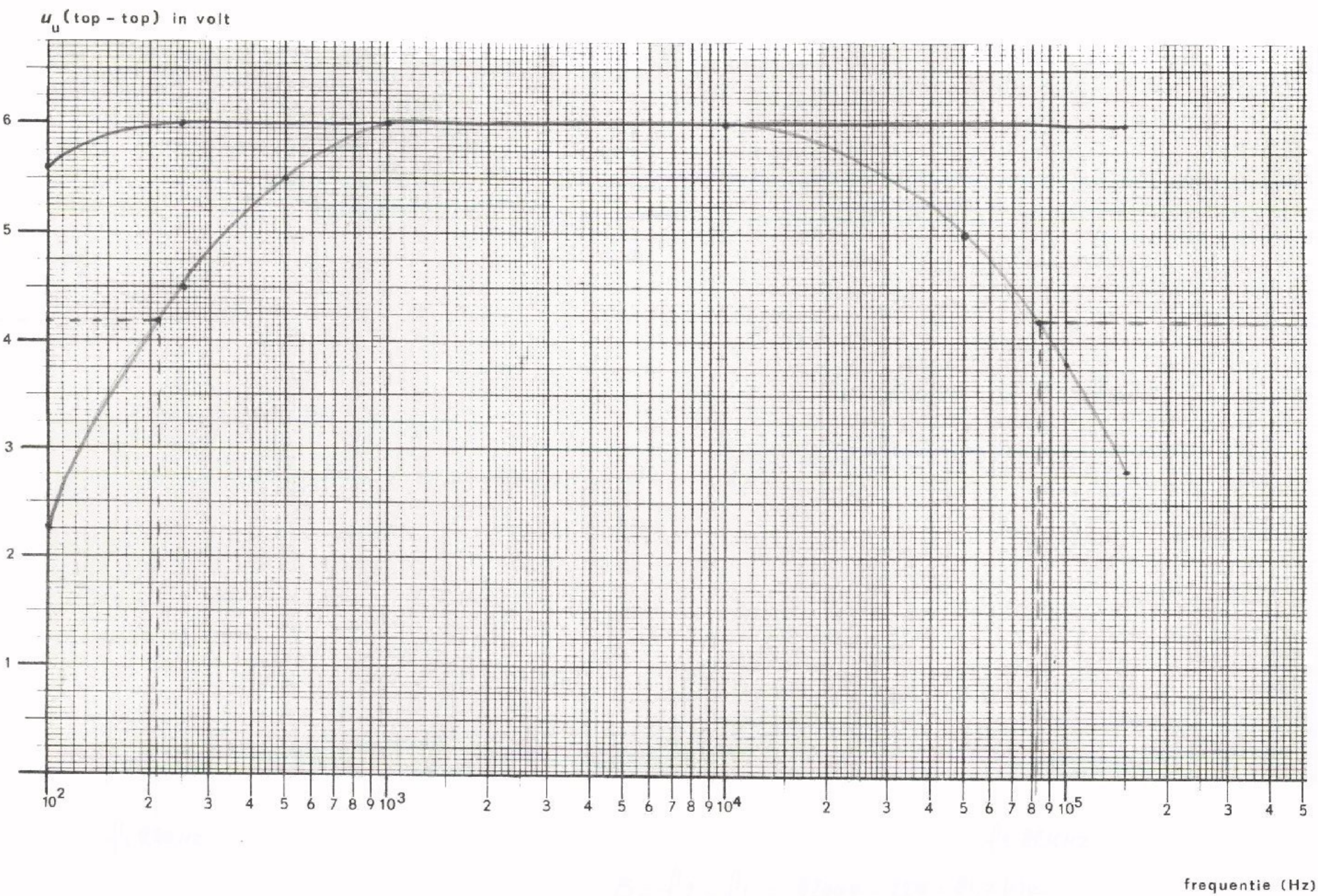
- Bepaal bij de lage en de hoge frequenties de punten waarbij de versterking nog 70% is van het maximum.

f_{laag} = [Hz] f_{hoog} = [kHz]

- Hoe groot is de spanningsversterking bij 10 kHz ? (Vergelijk met de berekening op pag. C05.8).

A_u = [ ]

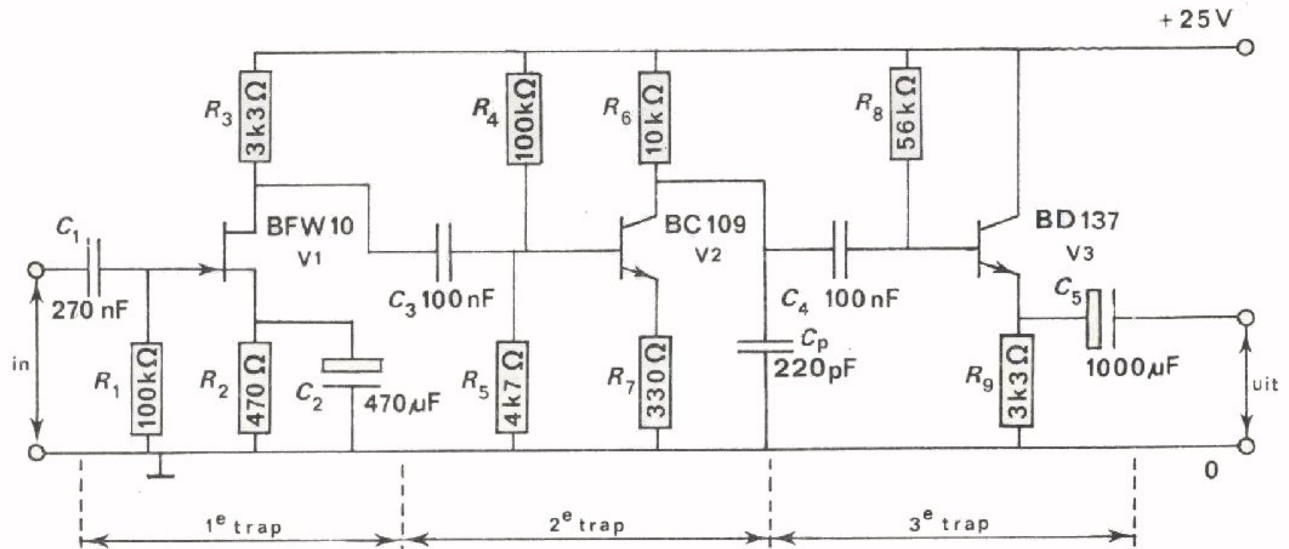
- Breek de schakeling niet af. Schakel wel de voedingsspanning uit. Verminder de intensiteit van de oscilloscoop.



u_u (top - top) in volt
frequentie (Hz)
1
2
3
4
5
6
10^2
10^3
10^4
10^5

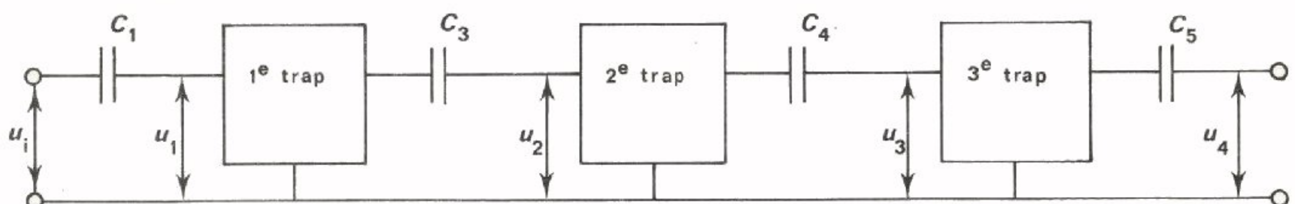
HET AFNEMEN VAN DE VERSTERKING BIJ LAGE FREQUENTIES

Bij de meting hebben we ervaren dat de versterking A_u afneemt als we de frequentie van de ingangsspanning verlagen. We gaan nu na waardoor dit wordt veroorzaakt.



VERMINDERING VAN VERSTERKING T.G.V. KOPPELCONDENSATORS

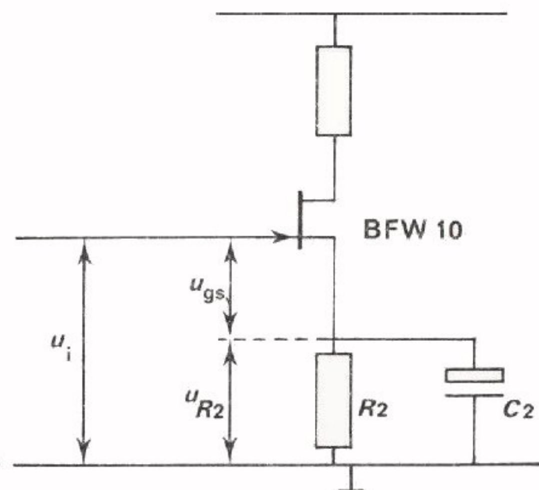
Aan de in- en uitgang van de versterker en tussen de versterkertrappen in zijn zogenaamde *koppelcondensators* aangebracht. Zij dienen om de gelijkspanningen van twee opeenvolgende trappen te scheiden en tóch wisselstromen door te laten. In de volgende figuur zijn C_1, C_3, C_4 en C_5 de koppelcondensators.



De capaciteitswaarden van de koppelcondensators zijn zo groot dat bij 10 kHz de wisselspanningen over C_1, C_3, C_4 en C_5 te verwaarlozen klein zijn t.o.v. de resp. wisselspanningen u_1, u_2, u_3 en u_4. Naarmate de frequentie van de ingangsspanning u_i lager wordt neemt de reactantie van de koppelcondensators toe ($X_C = \frac{1}{2\pi f . C}$). Dit gaat ten koste van de ingangsspanningen van de drie versterkertrappen. De totale spanningsversterking neemt dus bij lage frequenties af. De koppelcondensators vormen slechts één van de oorzaken dat bij afnemende frequentie de versterking A_u kleiner wordt. Op het volgende blad komen we hierop terug.

Een andere oorzaak dat A_u bij afnemende frequentie vermindert vormen de *ontkoppel-condensators*. In ons voorbeeld komt er één voor, namelijk C_2.

Hiernaast is de eerste versterkertrap getekend waarin C_2 zich bevindt. Bij een niet al te lage frequentie, 10 kHz in ons geval, vormt X_{C2} praktisch een kortsluiting voor wisselstroom. Dan komt de gehele spanning u_i tussen gate en source te staan.



Bij een zeer lage frequentie is $\frac{1}{2\pi f.C_2}$ niet meer een kortsluiting.

Dan komt een deel van u_i over R_2 te staan zodat tussen gate en source een kleinere spanning u_{gs} overblijft. Hierdoor is A_{ui} dan afgenomen.

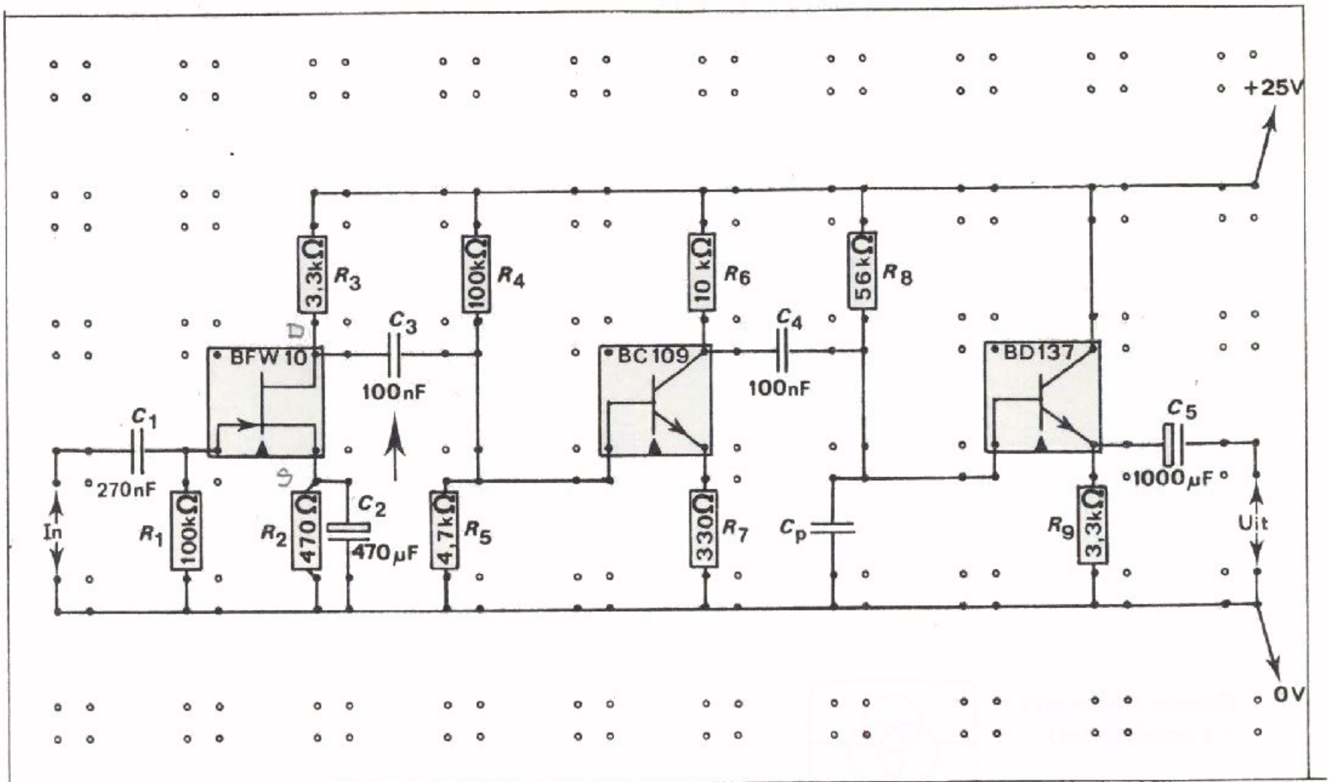
We merken dus op:

Naarmate de koppel- en ontkoppelcondensators groter zijn, zal de amplitude-frequentie-karakteristiek bij een lagere frequentie gaan afvallen.

OEFENINGEN

- Koppelcondensators in een versterker dienen om:
  - o gelijkstroom én wisselstroom door te laten;
  - o gelijkstroom én wisselstroom te blokkeren;
  - o gelijkstroom door te laten en tevens wisselstroom te blokkeren;
  - o gelijkstroom te blokkeren en tevens wisselstroom door te laten.
- Als men C_2 weglaat vermindert A_{u1}:
  - o alleen bij lage frequentie.
  - o alleen bij hoge frequenties.
  - o voor alle frequenties.
  - o alleen bij lage- en bij hoge frequenties.
- Veroorzaakt C_5 een vermindering van versterking ?
  - Als de uitgang niet wordt belast: **ja/neen**
  - Als de uitgang wel wordt belast: **ja/neen**

OPDRACHT: HET METEN VAN DE INVLOED VAN KOPPELCONDENSATORS



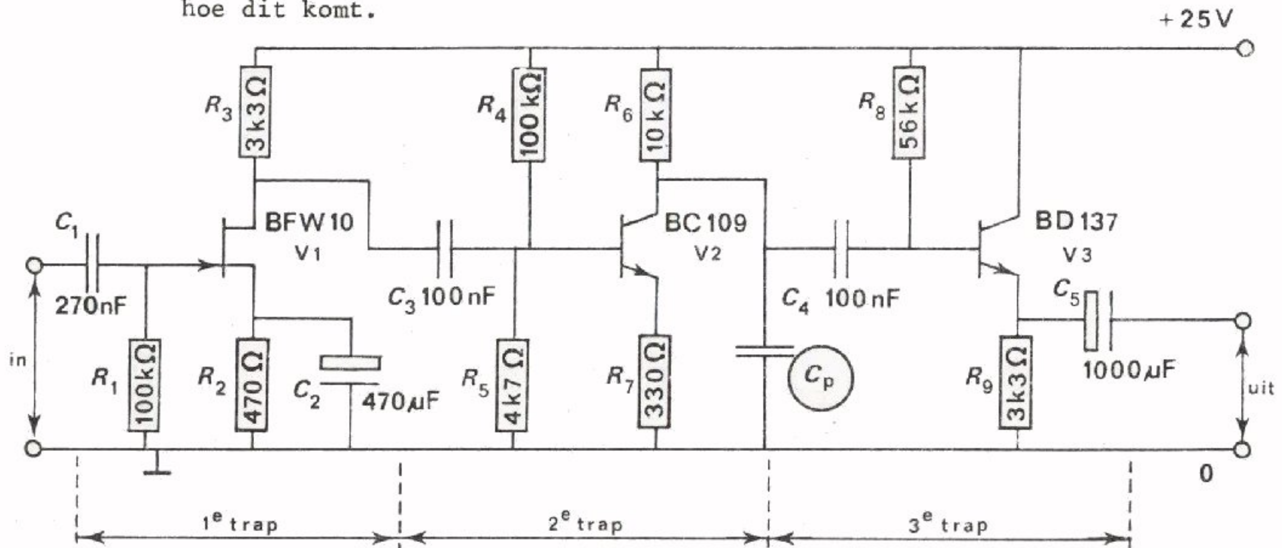
- Schakel de voedingsspanning van de versterker in.
- Maak de uitgangsspanning van de versterker 6 V top-top bij een frequentie van 10 kHz.
- Plaats een condensator van 1 µF i.p.v. de koppelcondensator C_3.
- Meet de uitgangsspanning van de versterker bij de frequenties:

f	100 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz
$2\,U_{ut}$ (V)				

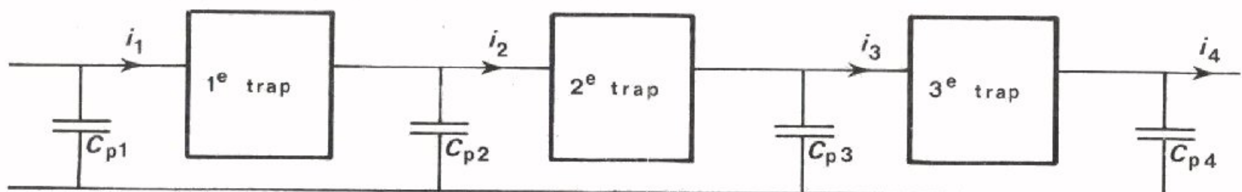
- Vul de meetresultaten in op het grafiekenpapier van blad C05.12. Trek een vloeiende lijn door de meetpunten.
- Vergelijk de nieuwe amplitude-frequentie-karakteristiek met die waarbij C_3 = 0,1 µF.
  Wat merkt U op ?
- Verwissel de condensator van 1 µF met de oorspronkelijke van 0,1 µF.
- Breek de schakeling niet af. Schakel de voedingsspanning uit.

AFNEMEN VAN A_u BIJ HOGE FREQUENTIES

Bij het meten van de amplitude-frequentie-karakteristiek is gebleken dat ook bij hoge frequenties de versterking vermindert. We gaan na hoe dit komt.

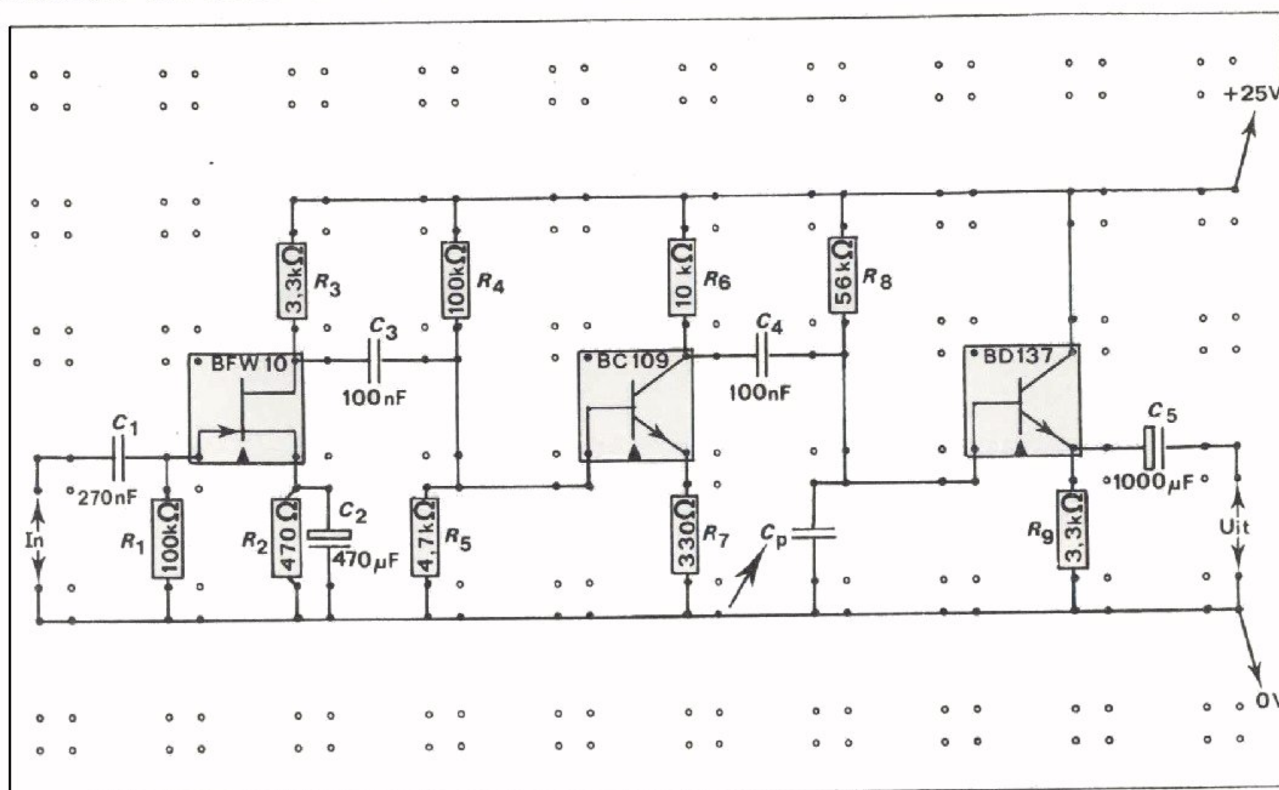


Tussen de ingangsklemmen van iedere versterktrap, en ook tussen de uitgangsklemmen, bevinden zich zogenaamde *parasitaire capaciteiten.* Dit zijn de capaciteiten die zich tussen de aansluitklemmen van weerstanden, transistors en andere praktische componenten bevinden. De aanwezigheid van parasitaire capaciteiten is dus onvermijdelijk.
Alle capaciteiten aan de ingang van de 1e versterkertrap zijn in onderstaand blokschema samengevat tot één capaciteit C_{p1}. Alle capaciteiten tussen de 1e en 2e trap zijn weergegeven door C_{p2}, enz. De scheidingscondensators zijn in dit schema weggelaten omdat ze bij hoge frequenties toch geen invloed hebben.



De waarden van de parasitaire capaciteiten zijn zo klein dat bij 10 kHz de wisselstromen door C_{p1}, C_{p2}, C_{p3} en C_{p4} te verwaarlozen klein zijn resp. t.o.v. de stromen i_1, i_2, i_3 en i_4. Naarmate de frequentie van het te versterken signaal hoger wordt neemt de reactantie van de parasitaire capaciteiten af ($X_C = \frac{1}{2\pi f.C}$). Dit gaat ten koste van de ingangsstromen van de drie versterkertrappen. De totale spanningsversterking neemt dus bij hoge frequenties af.
Op het volgende blad gaan we de invloed van parasitaire capaciteiten meten. Bij deze meting nemen we de condensator C_p (zie schema) weg.
Volgens bovenstaande moet de amplitude-frequentie-karakteristiek aan de hoge frequentie-kant dan verder doorlopen.

OPDRACHT: HET METEN VAN DE INVLOED VAN PARASITAIRE CAPACITEITEN



- Sluit een voedingsspanning van 25 V aan. Voer een sinusvormige spanning van 10 kHz toe. Zorg ervoor dat de top tot top-waarde van de uitgangsspanning 6 V is.
- Neem de condensator C_p weg.
- Meet de uitgangsspanning bij de frequenties 50 kHz, 100 kHz en 150 kHz.

f	10 kHz	50 kHz	100 kHz	150 kHz
$2U_{ut}$ (V)				

- Vul de resultaten in op het grafiekenpapier C05.13. Trek een vloeiende lijn door de meetpunten.
- Vergelijk de amplitude-frequentie-karakteristiek met die waarbij de condensator van 220 pF wel is aangebracht.

Wat merkt U op?

OVERZICHT VAN DE BELANGRIJKSTE EIGENSCHAPPEN

De drietraps-versterker die we in deze les nader hebben bekeken heeft de volgende eigenschappen:

- De ingangsweerstand is tamelijk hoog (100 kΩ)
  Voor het uitsturen van de versterker is dus een gering ingangsvermogen nodig.

- De maximaal toelaatbare ingangsspanning is 28 volt (topwaarde). Boven deze waarde is de kans groot dat doorslag optreedt bij de toegepaste FET.

- De uitgangsweerstand van de versterker is nogal klein (≈ 200Ω).
  Men kan de uitgang daarom met een tamelijk kleine weerstand belasten. Bij belasting met een weerstand van 1,8 kΩ daalt de uitgangsspanning 10%.

- De maximaal mogelijke uitgangsspanning bedraagt theoretisch 12,5 volt (topwaarde), bij de gegeven voedingsspanning van 25 V. In de praktijk is de maximaal onvervormde uitgangsspanning wel iets lager dan de halve voedingsspanning.
  In ons geval kan de eindtransistor BD137 in onbelaste toestand maximaal een onvervormde wisselspanning met een amplitude van ca. 10 V leveren.

- De spanningsversterking is bij 10 kHz ongeveer 150.
  Daarbij treedt er geen faseverschil op tussen de uit- en ingangsspanning.

- Uit de voorgaande gegevens volgt dat de maximale amplitude van de ingangsspanning, waarbij de uitgangsspanning onvervormd blijft, gelijk is aan:

$$U_{it(max)} = \frac{U_{ut\ (max)}}{A_u} = \frac{10\ V}{150} \simeq 70\ mV$$

- De bandbreedte van de versterker bedraagt ca. 100 kHz.
  We hebben ervaren dat bij gebruik van grotere koppelcondensators de amplitude-frequentie-karakteristiek aan de lage frequentie-kant verder doorloopt. Verder hebben we gezien dat parasitaire capaciteiten de oorzaak zijn van vermindering van versterking bij hoge frequenties.

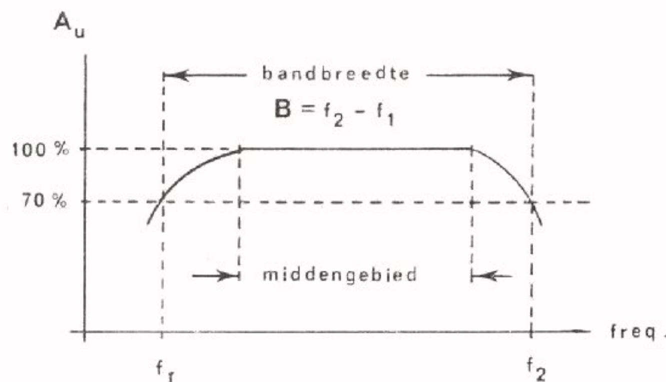
VOOR WELK DOEL DEZE VERSTERKER GESCHIKT IS

Dit is een versterker die men bijvoorbeeld in meetapparatuur kan gebruiken.
Sluit men op de uitgang een gelijkrichter met draaispoelmeter aan, dan heeft men een versterkervoltmeter voor het meten van kleine wisselspanningen verkregen.

De versterker is beslist ongeschikt als geluidsversterker.
In de eerste plaats komt het middengebied van de amplitude-frequentiekarakteristiek niet overeen met het hoorbare frequentiegebied van 20 Hz tot 20 kHz.
Bovendien is het maximaal mogelijke uitgangsvermogen te klein om een luidspreker uit te sturen. De eindtrap is hier nl. ingesteld op afgifte van maximale *spanning* en niet op afgifte van maximaal *vermogen*.

SAMENVATTING

- De eigenschappen aan de uitwendige klemmen van een versterker hangen af van de inwendige opbouw van de schakeling en de eigenschappen van de daarbij gebruikte componenten.
- De ingangseigenschappen van een versterker worden hoofdzakelijk bepaald door de eerste trap van die versterker.
- De uitgangseigenschappen van een versterker worden hoofdzakelijk bepaald door de laatste trap van die versterker.
- De overdrachtseigenschappen zijn afhankelijk van de totale opbouw van de versterker.
- De amplitude-frequentie-karakteristiek van een versterker is een grafiek die aangeeft hoe groot de wisselspanningsversterking A_u bij uiteenlopende frequenties is.

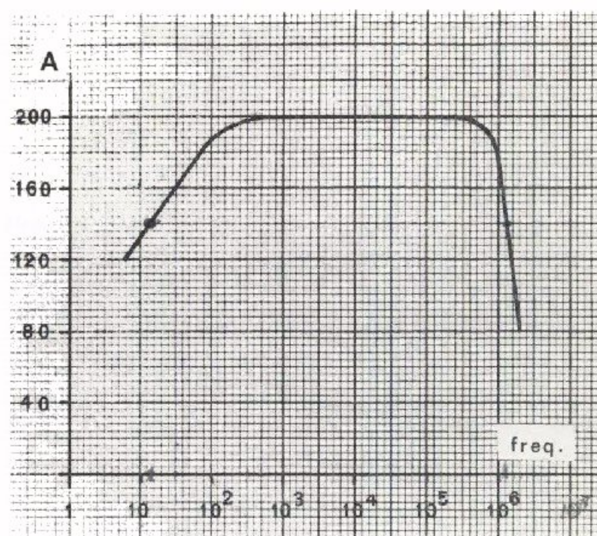


- De bandbreedte *B* van een versterker is het verschil tussen de frequenties f_1 en f_2 waarbij de *spannings*versterking gedaalt is tot 70% van de A_u in het middengebied.
  Een andere definitie luidt:
  De bandbreedte van een versterker is het verschil tussen de frequenties f_1 en f_2 waarbij de *vermogens*versterking 3 dB gedaald is t.o.v. de A_p in het middengebied.
- Bij *lage* frequenties wordt het afnemen van de versterking veroorzaakt door koppel- en ontkoppelcondensators.
  Naarmate de capaciteitswaarden van de koppel- en ontkoppelcondensators groter zijn, zal de amplitude-frequentie-karakteristiek tot een lagere frequentie vlak blijven.
- Bij *hoge* frequenties is het afnemen van de versterking te wijten aan onvermijdelijke parasitaire capaciteiten.
  Door het gebruik van capaciteits-arme componenten en het toepassen van korte verbindingen tussen de componenten, zal de amplitude-frequentie-karakteristiek aan de hoge frequentie-kant verder doorlopen.

NAAM:

KLAS:

1. Hiernaast is de amplitude-frequentie-karakteristiek van een versterker gegeven.



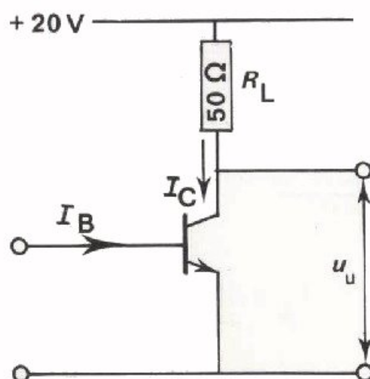
- De bandbreedte van de versterker is:

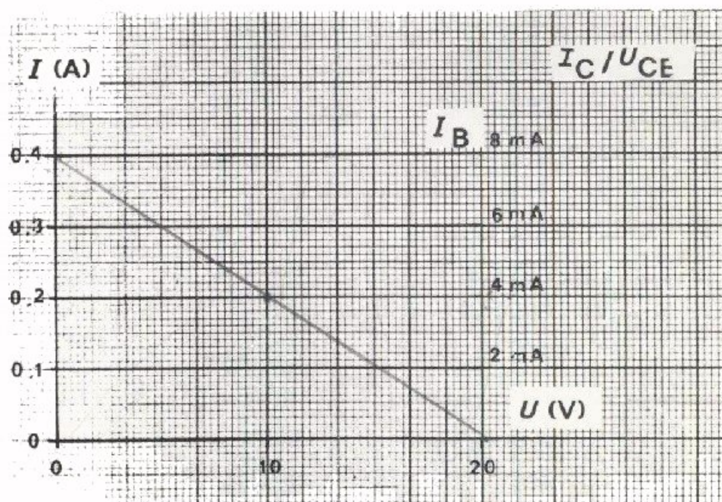
  B = kHz

- Vermindering van A_u bij lage frequenties is te wijten aan:

- Vermindering van A_u bij hoge frequenties is te wijten aan:

2. In onderstaande figuur is de eindtrap van een versterker weergegeven. De basisstroom I_b = 4 mA.
   Daarnaast staat de I_C-U_{CE}-karakteristiek van de toegepaste transistor.
   De voedingsspanning is 20 V.



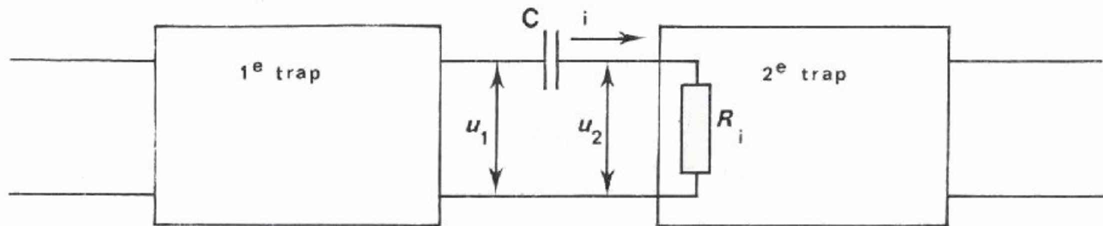


- Hoe groot is de maximale amplitude van de onvervormde u_u? U_{ut} = V

- Hoe groot is de maximale amplitude van de onvervormde i_c? I_{ct} = A

- Hoe groot is het maximale vermogen in R_L? P_{max} = W

3. De eerste trap van een tweetraps versterker levert bij lage frequenties een spanning u_1. De spanning u_2 wordt verder door de tweede trap versterkt.



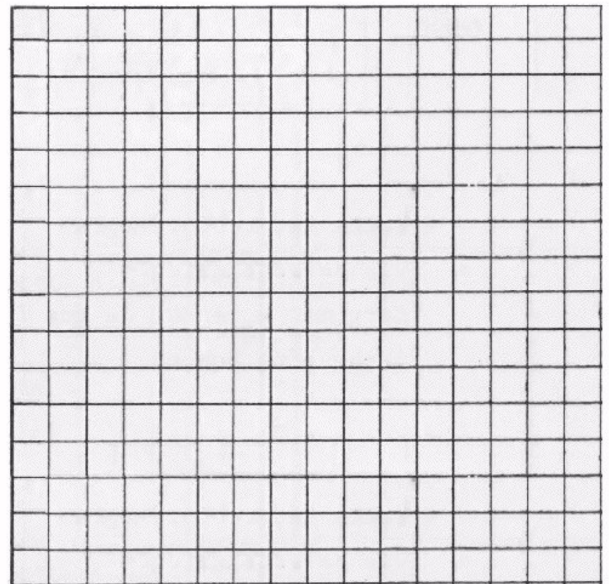
Verder is gegeven:

U_1 = 140 mV; C = 1 µF; R_i = 16 kΩ.

Bij één bepaalde frequentie f_1 valt over de C evenveel spanning als over de R_i. In dit geval is $\frac{1}{2\pi f_1 \cdot C} = R_i$

- Bereken de frequentie f_1. f_1 = [Hz]

- Teken hiernaast het vectordiagram van u_2, u_C en u_1 dat geldt bij de frequentie f_1. Ga hierbij uit van de richting van de stroom i zoals hiernaast is weergegeven.



- Bepaal de spanning U_2 U_2 = [mV]

- Bepaal het faseverschil tussen u_1 en u_2 = [graden]

4. Vul in:

Een vermindering van spanningversterking van 30% komt overeen met een vermindering van vermogensversterking van [dB]

C 6

V E R S T E R K E R S C H A K E L I N G E N I I I

T E G E N K O P P E L E N

BELANGRIJKSTE PUNTEN UIT DE VORIGE LES

In les C5 hebben we het inwendige van een versterker besproken. Daarbij hebben we ervaren dat de eigenschappen van een versterker afhangen van de eigenschappen van de gebruikte componenten en van de manier waarop zij geschakeld zijn.
In het algemeen geldt:

- de ingangseigenschappen van een versterker hangen in hoofdzaak af van de eerste versterkertrap.
- De uitgangseigenschappen hangen af van de laatste versterkertrap.
- De overdrachtseigenschappen, zoals versterking en bandbreeedte, worden bepaald door de samenstelling van de hele versterker.

WAT GAAN WE IN DEZE LES BEHANDELEN?

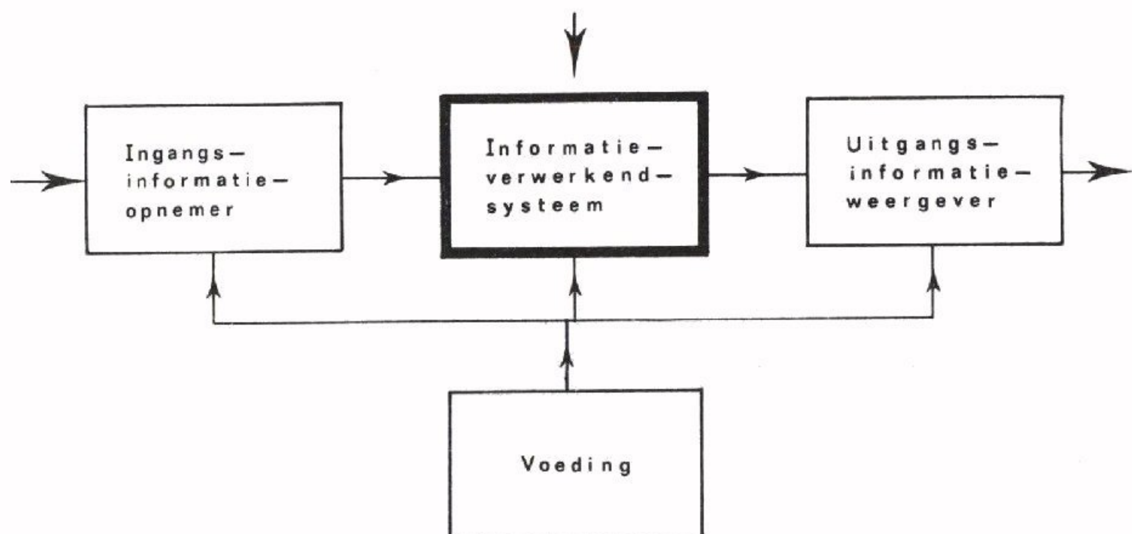
In deze les behandelen we het principe van *tegenkoppeling*.
Wat dit precies is, komt in de volgende bladen uitvoerig ter sprake. Wel vertellen we nu al dat door een versterker tegen te koppelen een aantal eigenschappen sterk verbeterd kan worden.
Zo kan men door tegenkoppeling bijvoorbeeld verkrijgen:

- een constantere gelijkstroominstelling
- een constantere versterking
- een grotere bandbreedte
- een hogere ingangsweerstand
- een lagere uitgangsweerstand

Het verbeteren van de eigenschappen gaat echter wel ten koste van de versterking! Deze neemt af door het tegenkoppelen.

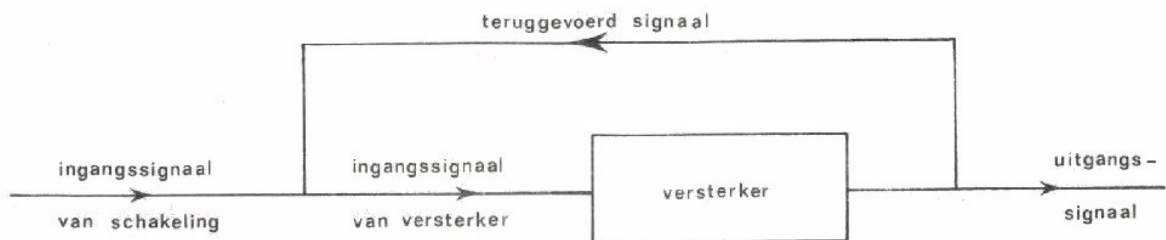
TER ORIENTATIE

We zijn nog steeds bezig met de functie "versterken". Deze functie hoort thuis bij de informatie*verwerking* (zie blokschema)



TERUGKOPPELEN, MEEKOPPELEN, TEGENKOPPELEN

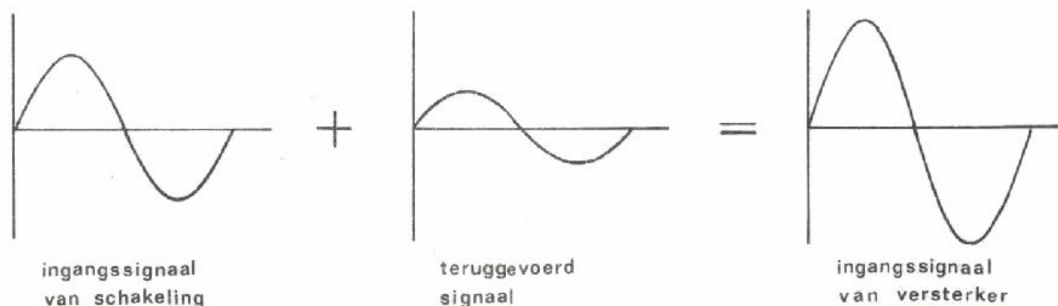
Bij het *terugkoppelen* van een versterker wordt een deel van het uitgangssignaal teruggevoerd naar de ingang.



Uit bovenstaand figuur volgt dat:

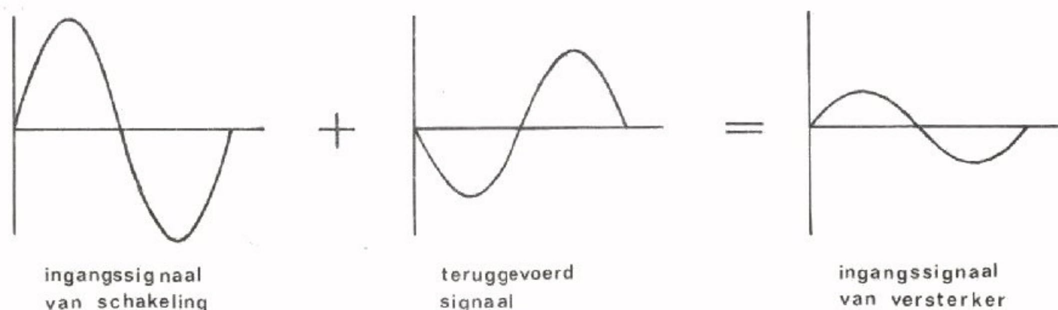
[ingangssignaal van schakeling] + [teruggevoerd signaal] = [ingangssignaal van versterker]

Heeft het teruggevoerde signaal een zodanige fase dat het ingangssignaal van de eigenlijke versterker erdoor wordt *vergroot*, dan spreekt men van *meekoppeling*.



ingangssignaal van schakeling + teruggevoerd signaal = ingangssignaal van versterker

Heeft het teruggevoerd signaal een zodanige fase dat het ingangssignaal van de eigenlijke versterker erdoor wordt *verkleind*, dan spreekt men van *tegenkoppeling*.



ingangssignaal van schakeling + teruggevoerd signaal = ingangssignaal van versterker

Het principe van *mee*koppeling past men toe in schakelingen waarmee elektrische signalen worden opgewekt, de zogenaamde generators of oscillators.

Het principe van *tegen*koppeling past men vaak toe in versterkers om een aantal van hun eigenschappen te verbeteren. Hierop gaan we in de les verder in.

EEN PRAKTISCH VOORBEELD VAN TEGENKOPPELEN

Op de vorige pagina hebben we beweerd dat d.m.v. tegenkoppelen de eigenschappen van versterkers kunnen worden verbeterd. Zo kan men d.m.v. tegenkoppelen bijv. de *gelijkstroominstelling* van een transistortrap constant maken, ondanks het feit dat sommige eigenschappen van de transistor zelf wél veranderen (bijv. ten gevolge van temperatuur-veranderingen).

In fig. a is een veelvuldig toegepaste versterkerschakeling getekend. De gelijkstroom I_C is hier *niet* stabiel. Dit blijkt uit het volgende:

$$I_B = \frac{U - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{U - 0,7}{R_B} \approx \text{constant}$$

Bij constante waarde van U en R_B zal I_B ook constant zijn, omdat de U_{BE} van een transistor een bepaalde stabiele waarde heeft (bij siliciumtransistors ca. 0,7 V).

$$I_C = h_{FE} \cdot I_B$$

De waarde van h_{FE} is afhankelijk van de temperatuur. Bovendien loopt de h_{FE} voor transistors van eenzelfde type sterk uiteen. Daarom zal de I_C van schakelingen volgens fig. a. geen bepaalde constante waarde hebben.

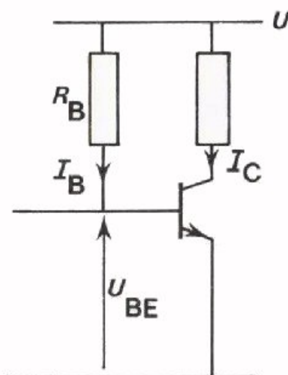


Fig. a

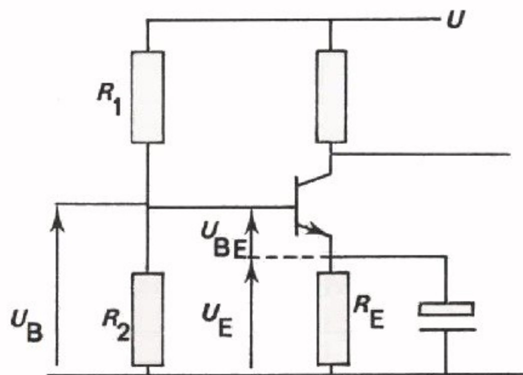


Fig. b

Fig. b. geeft eenzelfde type versterker waarvan de I_C *wel* is gestabiliseerd. Dit blijkt uit het volgende:

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} \simeq \frac{U_B - 0,7}{R_E} \quad \text{Hierin is: } U_B \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \, U \approx \text{constant}$$

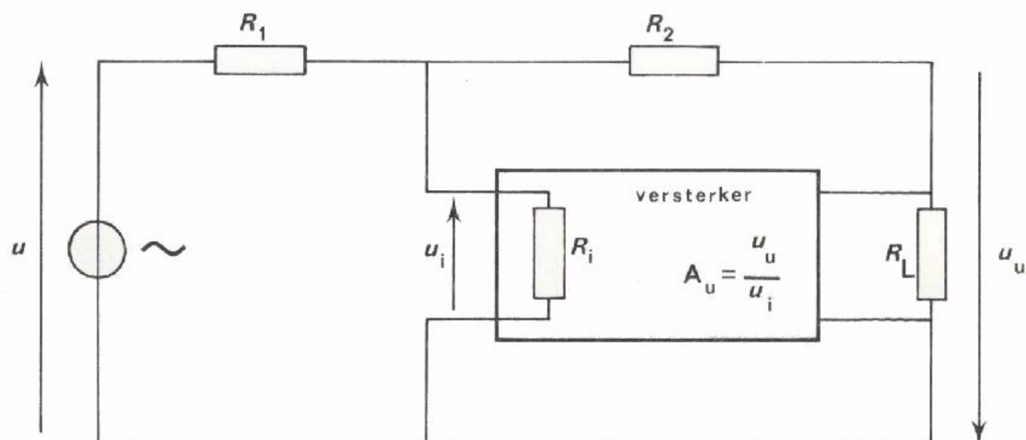
$$I_C \simeq I_E \simeq \frac{U_B - 0,7}{R_E}$$

In deze schakeling zijn I_E en I_C dus vrijwel onafhankelijk van de transistoreigenschappen.

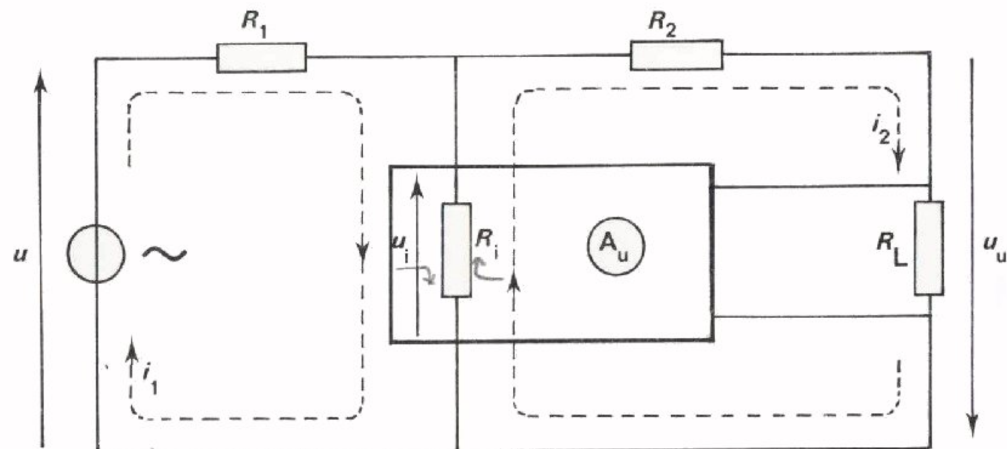
We merken op dat in fig. b. sprake is van tegenkoppeling. Immers: aan de schakeling wordt de gelijkspanning U_B toegevoerd. Hierdoor ontstaat een gelijkspanning U_E. Deze wordt zodanig teruggevoerd naar de ingang dat de ingangsspanning van de transistor U_{BE} kleiner wordt. Er is hier dus inderdaad sprake van tegenkoppeling. Het resultaat van deze tegenkoppeling is dat de gelijkstroom I_C wordt gestabiliseerd. Een dergelijke tegenkoppeling noemt men dan ook een *gelijkstroom*-tegenkoppeling.

EEN VEEL TOEGEPASTE MANIER VAN TEGENKOPPELEN

Op de vorige pagina hebben we gezien hoe één *enkele* versterkertrap kan worden tegengekoppeld. In onderstaande figuur is weergegeven hoe een *complete* versterker kan worden tegengekoppeld. Deze manier van tegenkoppelen wordt veelvuldig toegepast.



De toegepaste versterker heeft over het algemeen een zeer grote versterking A_u. Verder zorgt men ervoor dat u_u in tegenfase is met u_i (dit wordt in de tekening d.m.v. pijlen aangegeven). De terugkoppeling vindt plaats door het aanbrengen van de weerstand R_2. Dat deze tegenkoppeling inderdaad een *tegen*koppeling is zullen we aan de hand van de volgende tekening laten zien.



Het ingangssignaal van de schakeling (u) veroorzaakt door R_i een stroom i_1, en over de ingang van de versterker een spanning u_i. De uitgangsspanning u_u is in tegenfase met u en u_i. De uitgangsspanning u_u veroorzaakt zodoende door R_i een stroom i_2 die tegen stroom i_1 ingaat. De ingangsspanning van de versterker u_i wordt dus ten gevolge van i_2 verkleind. Er is hier dus sprake van *tegen*-koppeling. De aanwezigheid van R_2 maakt de tegenkoppeling mogelijk.

OEFENING:

Als we de waarde van R_2 kleiner maken wordt er **meer/minder** tegengekoppeld.

DE VERSTERKING VAN DE TEGENGEKOPPELDE SCHAKELING

Om straks verwarring te voorkomen gaan we eerst een paar zaken vastleggen.

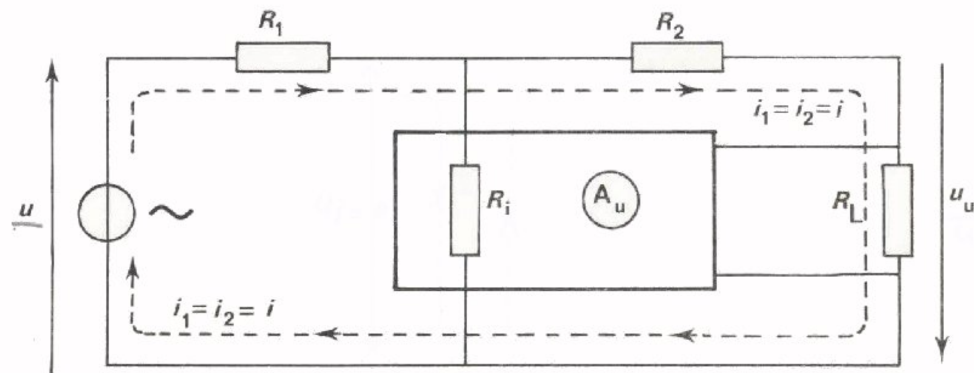
De spanningsversterking $\frac{u_{uit}}{u_{in}}$ van de versterker zelf noemen we A_u.

De spanningsversterking $\frac{u_u}{u}$ van de totale schakeling noemen we A_{ut}.

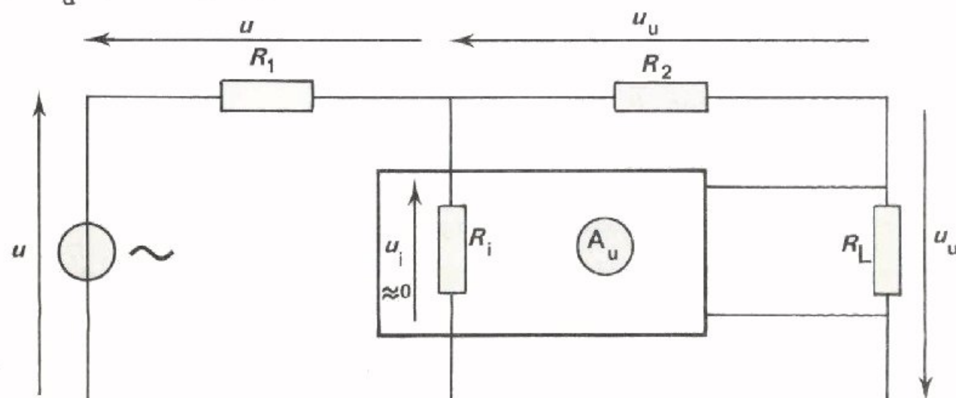
Op het vorige blad hebben we gezien dat door het aanbrengen van de weerstand R_2 er een stroom i_2 gaat lopen, die i_1 en u_i tegenwerkt. Hoe kleiner R_2 gekozen wordt, des te groter zal i_2 zijn en des te sterker de tegenkoppeling. In praktische schakelingen koppelt men zó sterk tegen dat i_2 *bijna even groot is als* i_1.

De gevolgen hiervan zijn:

1. De stroom door R_i is te verwaarlozen klein t.o.v. i_1 en i_2. Praktisch komt het erop neer dat u en u_u tezamen één stroom $i_1 = i_2 = i$ in het rond doen lopen (zie figuur).



2. Daar de stroom door R_i te verwaarlozen klein is, is de ingangsspanning van de versterker praktisch nul ($u_i \simeq 0$). Hieruit volgt dat de spanning over R_1 ongeveer gelijk is aan u, en de spanning over R_2 gelijk is aan u_u (zie figuur).



Uit het voorgaande kunnen we nu stellen:

$$A_{ut} = \frac{u_u}{u} \simeq \frac{i.R_2}{i.R_1} \simeq \frac{R_2}{R_1}$$

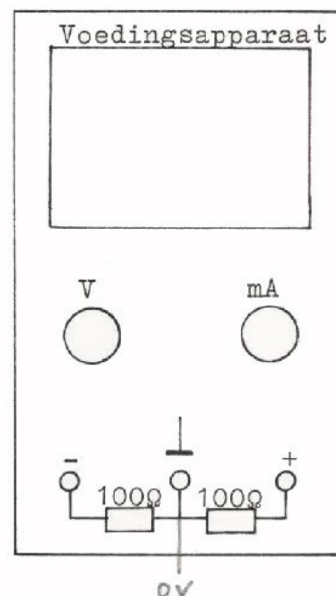
Dit resultaat gaan we op het volgende blad d.m.v. metingen controleren.

OPDRACHT: HET METEN VAN DE VERSTERKING

Bij de metingen in deze les gebruiken we een "geïntegreerde" versterker, die in een gesloten doosje is gemonteerd. Om deze versterker goed te laten werken, hebben we twee voedingsspanningen nodig: een positieve voedingsspanning van 15 V en een even grote negatieve voedingsspanning. Daar we slechts over één voedingsapparaat beschikken, gaan we als volgt te werk:

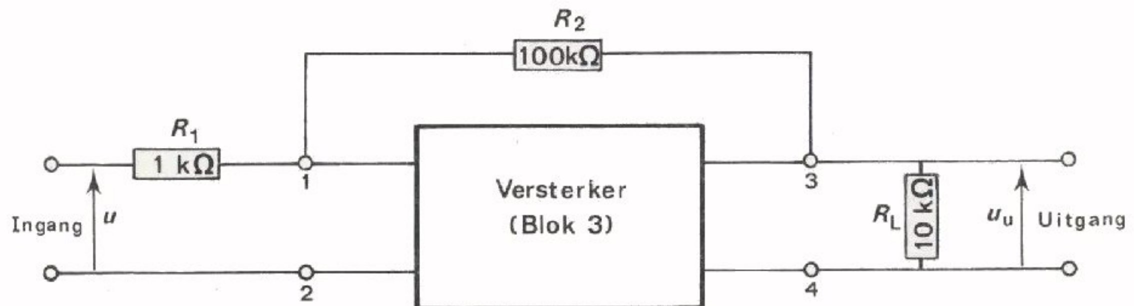
We plaatsen twee weerstanden van 100Ω tussen de klemmen van een voedingsapparaat (zie afbeelding).

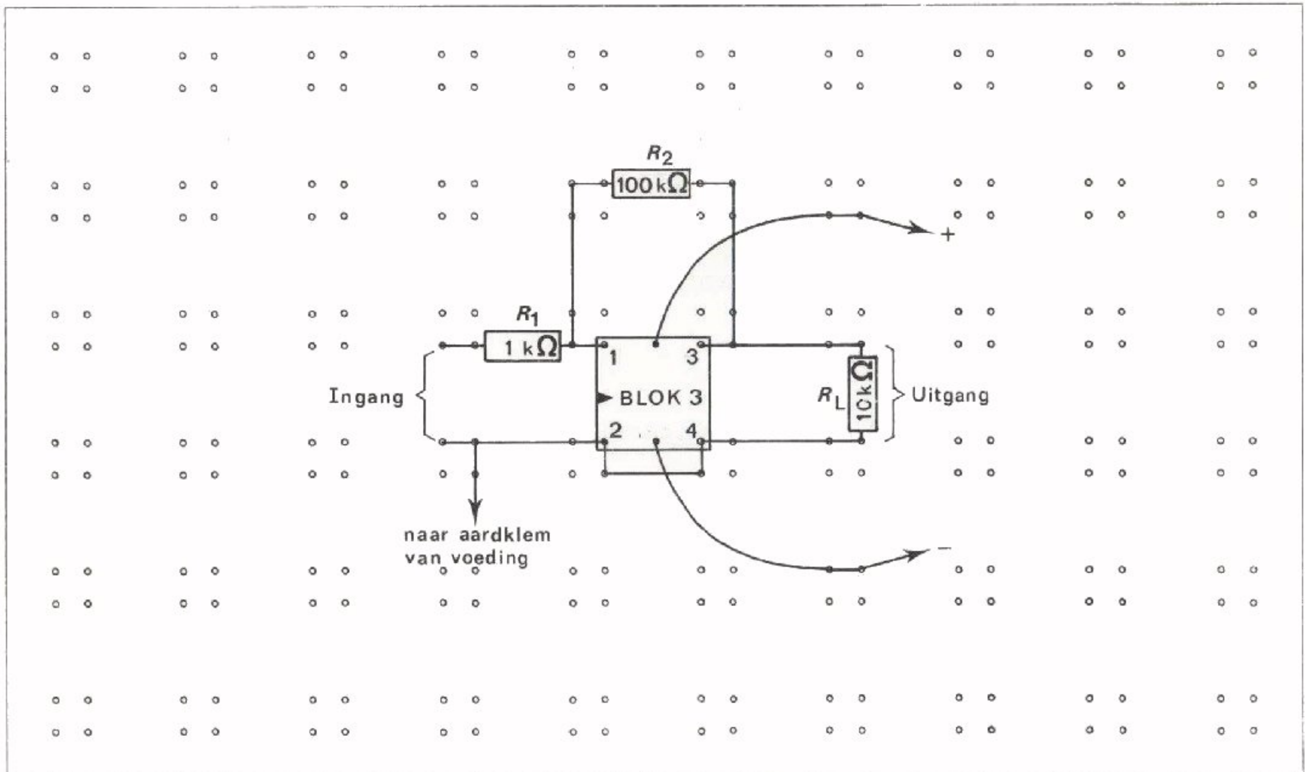
We stellen de spanning van de voeding in op 30 V en zetten het stroombereik op maximum. Er vloeit nu een stroom van 150 mA van de plusklem naar de min-klem. De linker bus wordt hierdoor 15 V negatief ten opzichte van aarde; de rechter bus 15 V positief ten opzichte van aarde. Controleer dit met behulp van een universeelmeter.



- Bouw de schakeling volgens blad C06.9 op Uw paneel.
- Sluit een LF-generator aan op de ingang van de schakeling. Maak de frequentie 1 kHz en de uitgangsspanning ongeveer 50 mV. Plaats een oscilloscoop over de uitgang van de versterker. Voer de voedingsspanningen van + 15 V naar - 15 V toe.
- Regel de generatorspanning tot de uitgangsspanning van de versterker gelijk is aan U_{ut} = 3 V.
- Meet de spanningsversterking $\frac{U_{ut}}{U_{it}}$ A_{ut} =
- Herhaal de voorgaande meting, maar nu met R_2 = 10 kΩ. A_{ut} =
- Controleer of de meetresultaten overeenkomen met de berekening op blad C06.7.
- Breek de schakeling nog niet af. Schakel wel de voedingsspanning uit.

MEETOPSTELLING





TEGENKOPPELEN MAAKT DE VERSTERKING CONSTANTER

We hebben geconstateerd dat bij onze tegengekoppelde versterker

$$A_{ut} \simeq \frac{R_2}{R_1}$$

Merk op dat in deze formule de versterkereigenschap A_u niet meer voorkomt.
De versterking met tegenkoppeling A_{ut} hangt alleen af van de waarde van R_1 en R_2, en niet meer van de versterkereigenschappen.
Dat wil zeggen:
Door tegenkoppelen is de versterking constanter geworden.

In de volgende opdracht gaan we met opzet de A_u van de versterker flink veranderen. Dit doen we door:

1. De belastingsweerstand R_L een factor twee lager te maken. Bij een niet-tegengekoppelde versterker zal hierdoor de uitgangsspanning (dus de versterking) verminderen.
2. De voedingsspanning van ± 15 V te verlagen tot ± 7,5 V. Ook hierdoor zal de versterking van een niet-tegengekoppelde versterker aanzienlijk verminderen.

We zullen constateren dat deze ingrepen nauwelijks invloed hebben op de versterking A_{ut}.

OPDRACHT: HET METEN VAN A_{ut} BIJ VERSCHILLENDE VERSTERKERTOESTANDEN

Gebruik de meetschakeling volgens blad C06.9.

- Meet A_{ut} bij f = 1 kHz, U_{ut} = 3 V, R_1 = 1 kΩ, R_2 = 10 kΩ, R_L = 10 kΩ en U = 30 V (+ en − 15 V).

  A_{ut} (in de normale toestand) = [ ]

- Meet A_{ut} bij f = 1 kHz, U_{ut} = 3 V, R_1 = 1 kΩ, R_2 = 10 kΩ, R_L = 5 kΩ (twee weerstanden van 10 kΩ parallel) en U = 30 V.

  A_{ut} (bij R_L = 5 kΩ i.p.v. 10 kΩ) = [ ]

- Meet A_{ut} bij f = 1 kHz, U_{ut} = 3 V, R_1 = 1 kΩ, R_2 = 10 kΩ, R_L = 10 kΩ en U = 15 V (+ en − 7,5 V).

  A_{ut} (bij U = 15 V i.p.v. 30 V) = [ ]

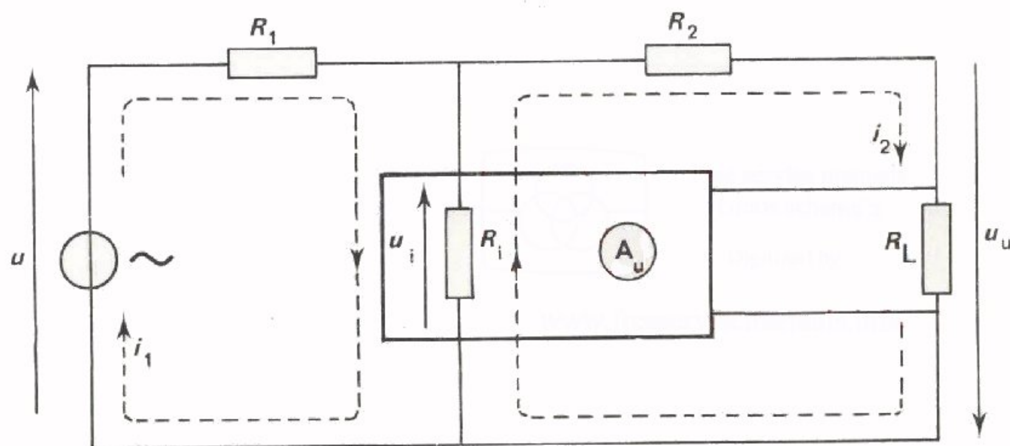
- Meet A_{ut} bij f = 1 kHz, U_{ut} = 3 V, R_1 = 1 kΩ, R_2 = 10 kΩ, R_L = 5 kΩ en U = 15 V (+ en − 7,5 V).

  A_{ut} (bij U = 15 V i.p.v. 30 V, en R_L = 5 kΩ i.p.v. 10 kΩ) = [ ]

BANDBREEDTE VAN EEN TEGENGEKOPPELDE VERSTERKER

We hebben gezien dat de versterking van de tegengekoppelde versterker in hoofdzaak wordt bepaald door de verhouding van de weerstanden R_2 en R_1. Veranderingen van A_u door bijvoorbeeld voedingsspanningenvariaties of belastingsvariaties hadden bijna geen invloed op A_{ut}. Deze versterking met tegenkoppeling bleef vrijwel constant en ongeveer gelijk aan R_2/R_1.

We kunnen dit ook als volgt toelichten (zie figuur).
Als door een of andere oorzaak A_u kleiner wordt, wordt ook u_u kleiner. Dan wordt de teruggevoerde stroom i_2 kleiner. Het gevolg hiervan is dat van de toegevoerde stroom i_1 een kleinere i_2 wordt afgetrokken, zodat de spanning u_i toeneemt. Dit toenemen van u_i werkt uiteindelijk het afnemen van u_u tegen. Dus u_u neemt minder af dankzij het tegenkoppelen.



We hebben de versterking nog steeds beschouwd bij éénzelfde frequentie. f = 1 kHz. We gaan ook eens de versterking bij andere frequenties bekijken. Zoals U weet neemt de versterking A_u bij hoge frequenties af door de aanwezigheid van parasitaire capaciteiten. We hebben tot nu toe ervaren dat afnemen van A_u nog niet de A_{ut} merkbaar doet afnemen. De A_{ut} blijft zelfs bij een tamelijke grote vermindering van A_u nog vrijwel constant. Het is daarom te verwachten dat als A_u afneemt doordat de frequentie van de ingangsspanning hoger wordt, ook dán A_{ut} in veel mindere mate zal afnemen.

Door het tegenkoppelen zal de bandbreedte dus groter worden.

OEFENING

In deze les zijn tot nog toe al een drietal voordelen van tegenkoppelen aan de orde geweest. Welke ?

1.
2.
3.

OPDRACHT: HET METEN VAN DE BANDBREEDTE

Gebruik de meetschakeling volgens blad C06.9.

- Maak R_1 = 10 kΩ, R_2 = 1 MΩ, R_L = 10 kΩ.
  Gebruik een voedingsspanning van 30 V (+ en − 15 V).
  Voer een dusdanige wisselspanning van 1 kHz toe, dat U_{ut} = 3 V.
- Meet de hoge frequentie waarbij U_{ut} 30 % kleiner is dan die bij 1 kHz (bij gelijke ingangsspanning u).

f_{hoog} ≃ [kHz]

- Maak de terugkoppeling sterker door R_2 = 0,5 MΩ te maken (2 x 1 MΩ parallel). Zorg(bij 1 kHz) weer voor U_{ut} = 3 V.
- Bepaal opnieuw de hoge frequentie waarbij U_{ut} 30% kleiner is dan die bij 1 kHz (bij gelijke ingangsspanning)

f_{hoog} ≃ [kHz]

OPMERKING

Deze versterker is zo ingericht dat de versterking bij de *lage* frequenties niet vermindert. (Hoe men dit verwezenlijkt wordt in de volgende les behandeld).

- Controleer de versterking bij de lage frequenties.

- U kunt nu de schakeling afbreken.

CONCLUSIE

Bij R_2 = 1 MΩ bedraagt de bandbreedte: B = [kHz]

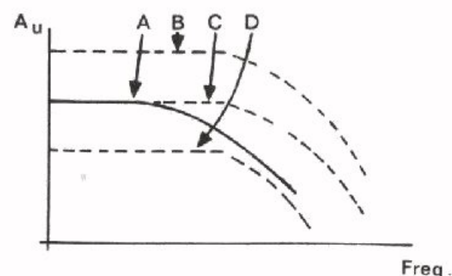
Bij R_2 = 0,5 MΩ bedraagt de bandbreedte: B = [kHz]

Door sterker tegen te koppelen neemt de bandbreedte blijkbaar [**toe/af**]

Het feit dat in een versterker sinusvormige spanningen met uiteenlopende frequenties niet evenveel worden versterkt noemt men *lineaire vervorming.*
Men zegt dan ook: *door tegenkoppeling wordt de lineaire vervorming van een versterker* [**groter/kleiner**]

OEFENING

In bijgaande figuur is kromme A de amplitude-frequentie-karakteristiek van een *niet* tegengekoppelde versterker. Bij tegenkoppeling van deze versterker verkrijgen we een amplitude-frequentie-karakteristiek zoals weergegeven door kromme [**B/C/D**].



DE SAMENHANG TUSSEN BANDBREEDTE EN VERSTERKING

Bij onze vorige meting hebben we geconstateerd dat de bandbreedte van een versterker groter wordt naarmate we sterker tegenkoppelen. Het voordeel van een groter frequentiegebied gaat dus ten koste van de versterking. Voor versterkers geldt:

bandbreedte X versterking ≃ constant

Controleer dit aan de hand van de meetresultaten uit voorgaande opdracht.

Bij R_2 = 1 MΩ: de spanningsversterking A_{ut} = ______

de bandbreedte B = ______

$A_{ut} \times B$ = ______

Bij R_2 = 0,5 MΩ: A_{ut} = ______

B = ______

$A_{ut} \times B$ = ______

De bewering "$A_u \times B \simeq$ constant" geldt niet alleen voor het geval een versterker wordt tegengekoppeld. Ook als we de versterking van een versterkertrap groter maken door bijvoorbeeld een grotere collectorweerstand te nemen, moet men erop rekenen dat de bandbreedte in nagenoeg dezelfde mate afneemt. De bewering gaat niet meer op als we in een versterker *actieve* componenten (bijv. een complete versterkertrap) toevoegen of wegnemen.

DE TEGENKOPPELFACTOR

Een versterker is sterker tegengekoppeld naarmate het teruggevoerde signaal groter is. Bij een sterk tegengekoppelde versterker is A_{ut} klein in vergelijking met A_u.

Men heeft een begrip *tegenkoppelfactor* F ingevoerd om aan te geven hoe sterk de tegenkoppeling is.

Onder F verstaat men:

$$F = \frac{A_u}{A_{ut}}$$

Een grote F betekent dus een sterke tegenkoppeling.

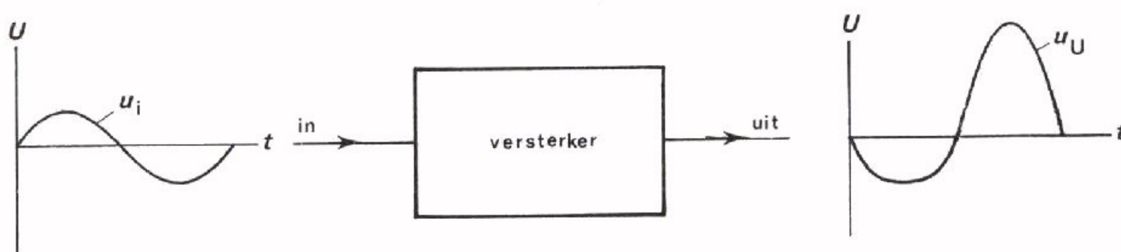
OEFENINGEN

De volgende opgaven hebben betrekking op de schakeling volgens blad 5.

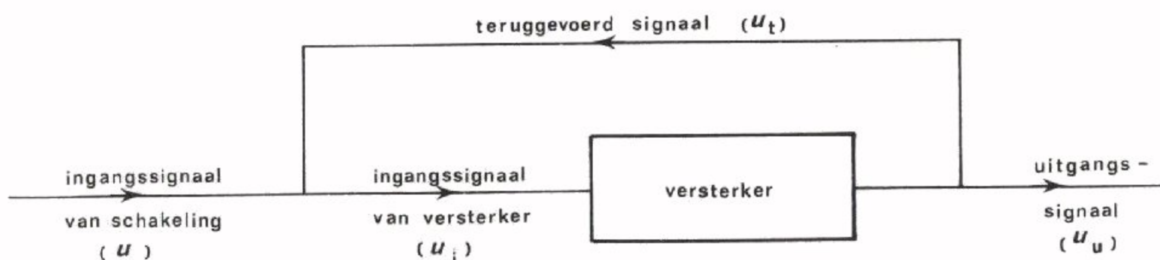
1. A_u = 100 000, R_2 = 25 kΩ en R_1 = 1 kΩ F = ______
2. R_1 = 2 kΩ, R_2 = 40 kΩ en F = 100. A_u = ______

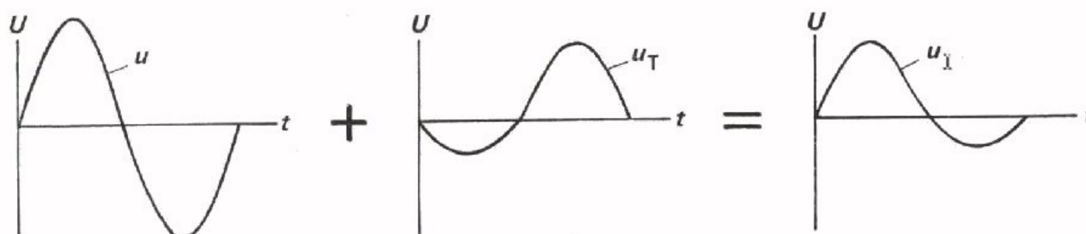
DOOR TEGENKOPPELING NEEMT DE NIET-LINEAIRE VERVORMING AF

Behalve lineaire vervorming treedt er bij versterkers ook *niet-lineaire vervorming* op. Men spreekt bij versterkers van niet-lineaire vervorming als een sinusvormige spanning na versterking niet meer sinusvormig verloopt, (zie figuur). De oorzaak van niet-lineaire vervorming kan bijv. de kromming van de overdrachtskarakteristiek van een transistor zijn.



Door tegenkoppeling neemt de niet-lineaire vervorming van een versterker af. Dit kunnen we als volgt zien: in bovenstaande figuur hebben we te maken met een versterker die de positieve toppen van de sinusvormige ingangsspanning *minder* versterkt, dan de negatieve toppen (we nemen aan dat de uitgangsspanning van de versterker in tegenfase is met de ingangsspanning), met behulp van deze versterker kunnen we tóch een sinusvormige uitgangsspanning verkrijgen door aan de versterker een spanning toe te voeren waarvan de positieve top *groter* is dan de negatieve top. Dit kunnen we m.b.v. *tegenkoppelen* bereiken (zie onderstaande figuren).





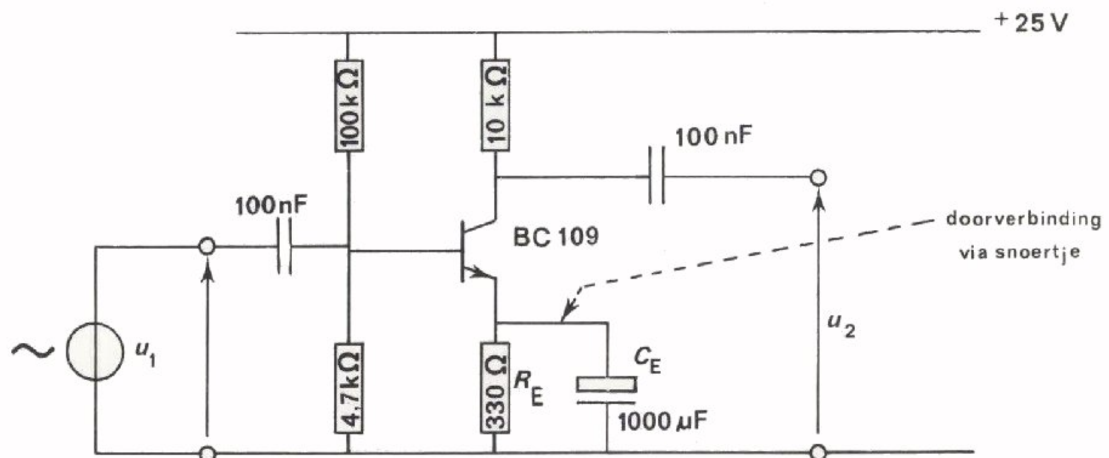
De ingangsspanning u vormt dus samen met het teruggevoerde signaal u_t de gewenste spanning u_i. Deze vervormde spanning wordt in de versterker weer zodanig "vervormd" dat de uitgangsspanning nagenoeg sinusvormig wordt.

OPMERKING Als de tegengekoppellus gesloten is zijn alle signalen sinusvormig, ook het teruggevoerde signaal. Een bewijs is dit verhaal dan ook niet. Zo'n bewijs volgt in volgende meetopdracht.

OPDRACHT: HET METEN VAN NIET-LINEAIRE VERVORMING

We gaan aan een versterkertrap meten die eerst niet en daarna wél wordt tegengekoppeld. De schakeling zoals in figuur getekend, is niet tegengekoppeld. Door het wegnemen van de ontkoppelcondensator C_E is de versterker wél tegengekoppeld.

- Bouw onderstaande schakeling op Uw paneel.

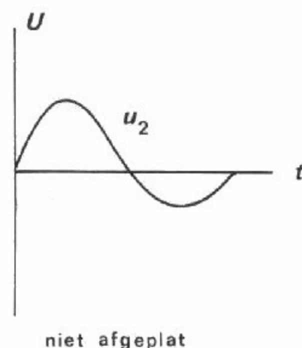


- Voer een spanning u_1 toe van 1 kHz en maak u_2 zichtbaar op het scherm van een oscilloscoop. Zorg ervoor dat U_{2t} zó groot is, dat het signaal net niet aan een kant wordt afgeplat (zie beneden). Dan is:

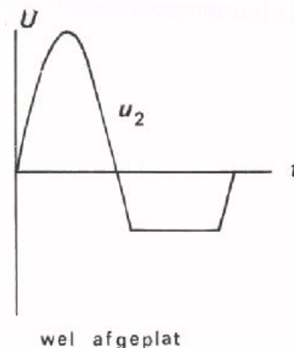
$U_{2t(pos)}$ = [V] $U_{2t(neg)}$ = [V]

- Verwijder C_E en maak u_1 zóveel groter, dat een even grote U_{2t} op het scherm zichtbaar is.

Conclusie: de niet-lineaire vervorming is nu **groter/even groot/kleiner**



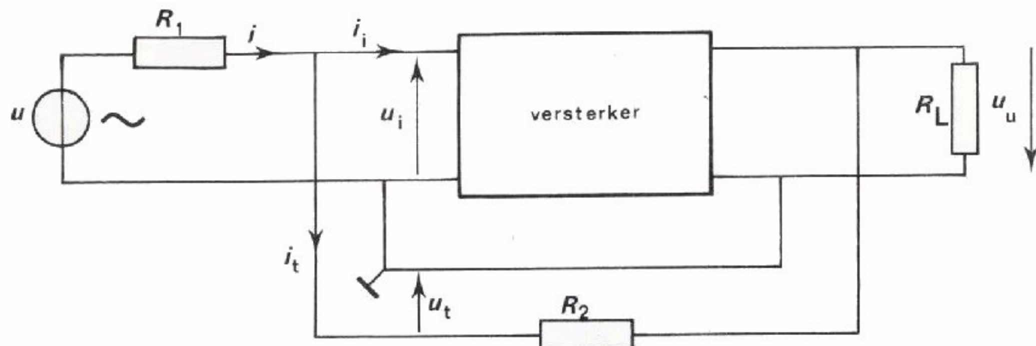
niet afgeplat



wel afgeplat

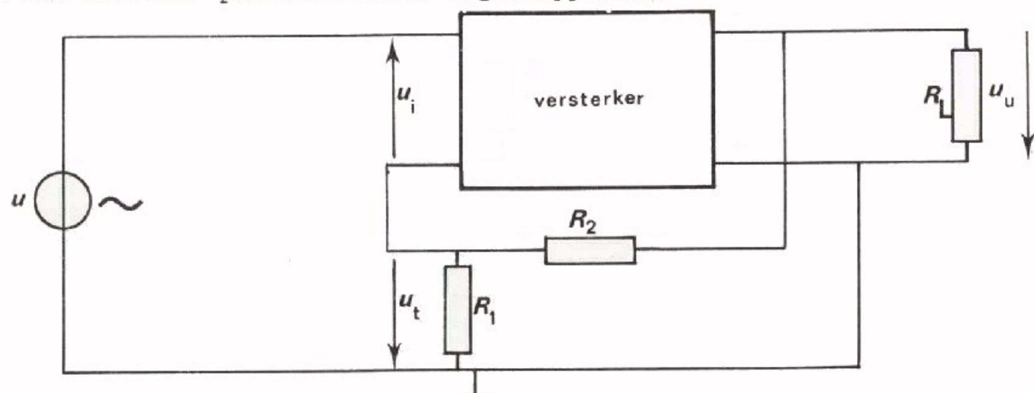
DIVERSE MANIEREN VAN TEGENKOPPELEN

De schakeling van blad 5 is één van de manieren om een versterker tegen te koppelen. We kunnen deze schakeling ook als volgt tekenen.



In deze tekening kan men duidelijk zien dat het teruggevoerde signaal *parallel* aan de belastingsweerstand R_L wordt afgenomen en ook *parallel* met de ingang van de versterker wordt toegevoerd. We noemen deze manier van tegenkoppelen een *parallel-parallel*-tegenkoppeling.

Een andere veel voorkomende wijze van tegenkoppelen is hieronder weergegeven. Evenals in bovenstaande schakeling wordt het teruggevoerde signaal *parallel* aan R_L afgenomen. Dit signaal wordt in onderstaande schakeling in *serie* met de ingang teruggevoerd. Deze manier van tegenkoppelen noemt men dan ook een *parallel-serie*-tegenkoppeling.



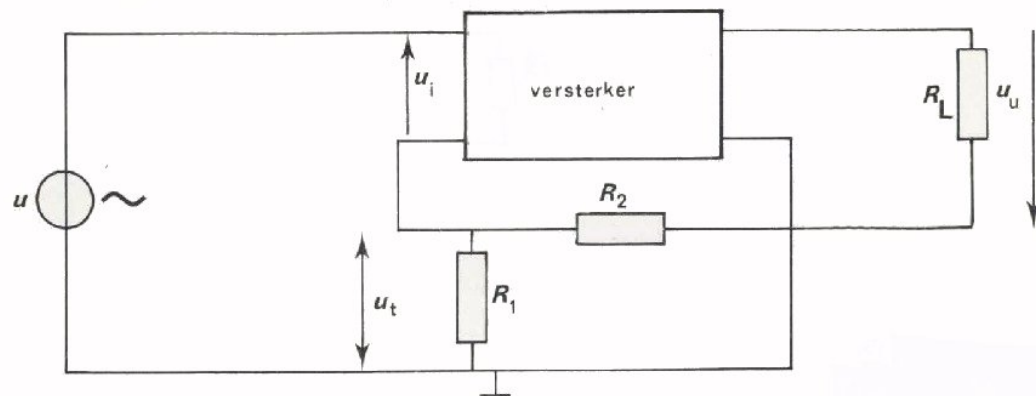
Het is ook mogelijk dat het teruggevoerde signaal in *serie* met R_L wordt afgenomen en daarna in *serie* of *parallel* met de ingang van de versterker wordt toegevoerd. Men spreekt dan over resp. *serie-serie*-tegenkoppeling en *serie-parallel*-tegenkoppeling. Deze tegenkoppelmethoden zijn op het volgende blad in tekening gebracht.

OEFENING

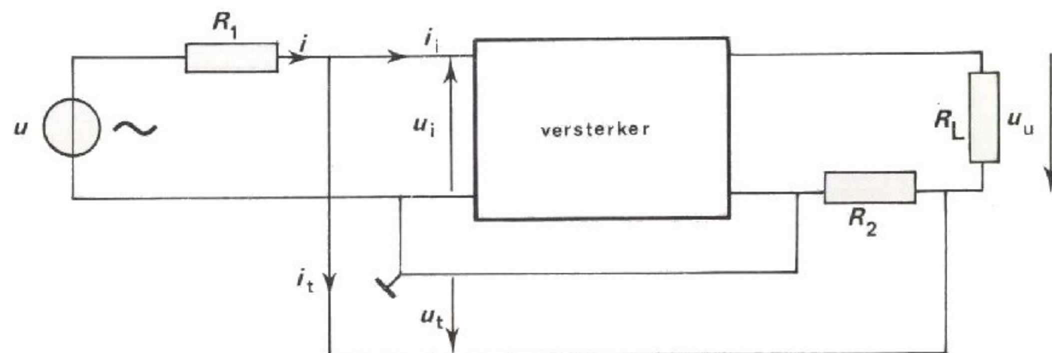
In bovenstaande schakeling met parallel-serie-tegenkoppeling is de fase van de ingangsspanning u op een bepaald moment zodanig dat de bovenkant van de bron positief is t.o.v. aarde.
Geef in de tekening met + en - aan hoe dan de polariteit is van de spanningen u_i en u_t.

DIVERSE MANIEREN VAN TEGENKOPPELEN

SERIE-SERIE-tegenkoppeling.



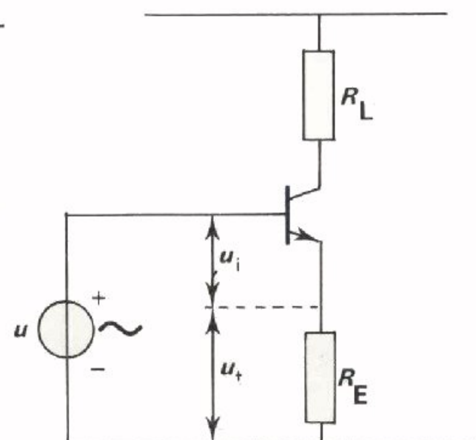
SERIE-PARALLEL-tegenkoppeling.



Voor al deze schakelingen gelden de voordelen van tegenkoppelen zoals op voorgaande pagina's is besproken. De verschillen in eigenschappen tussen de diverse schakelingen komen op het volgend blad aan de orde.

VOORBEELD

Hiernaast is een voorbeeld van een schakeling getekend waarbij serie-serie-tegenkoppeling is toegepast.
R_L is de belastingsweerstand. De versterker is tegengekoppeld d.m.v. de weerstand R_E, die in *serie* met R_L is geschakeld.
De spanning over R_E staat in *serie* met de basis-emitter-ingang.



OEFENING

Stel dat de ingangsspanning u een polariteit heeft zoals hiernaast is weergegeven.
Geef in de tekening met + en − aan hoe de polariteit van u_i en u_t is.

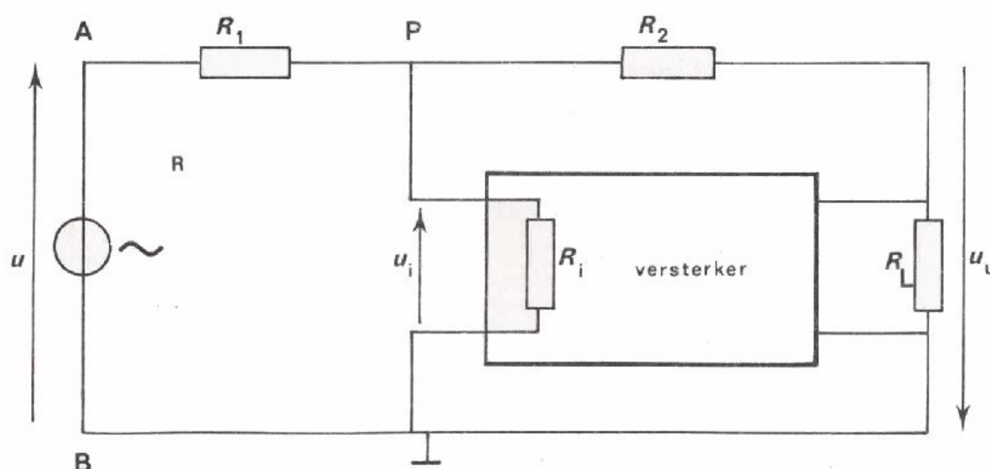
DOOR TEGENKOPPELEN KAN MEN DE INGANGSWEERSTAND EN/OF DE UITGANGSWEERSTAND VAN EEN VERSTERKER VERGROTEN OF VERKLEINEN

De manier van tegenkoppelen (zie vorige pagina) bepaalt of de ingangsweerstand resp. de uitgangsweerstand van een versterker groter of kleiner wordt. Het voert hier te ver om van de diverse tegengekoppelde versterkers de ingangs- en uitgangsweerstand te berekenen. We volstaan met de volgende vuistregels:

- Van een tegengekoppelde schakeling waarbij het teruggevoerde signaal *parallel* aan de belastingsweerstand wordt afgenomen, is de uitgangsweerstand *kleiner* dan zonder tegenkoppeling.
- Van een tegengekoppelde schakeling waarbij het teruggevoerde signaal in *serie* met de belastingsweerstand wordt afgenomen, is de uitgangsweerstand *groter* dan zonder tegenkoppeling.
- Van een tegengekoppelde schakeling waarbij het teruggevoerde signaal *parallel* aan de ingang van de versterker wordt toegevoerd, is de ingangweerstand *kleiner* dan zonder tegenkoppeling.
- Van een tegengekoppelde schakeling waarbij het teruggevoerde signaal in *serie* met de ingang van de versterker wordt toegevoerd, is de ingangsweerstand *groter* dan zonder tegenkoppeling.

VOORBEELD

Hieronder is nogmaals de tegengekoppelde versterker van blad 5 toegepast. In deze schakeling wordt *parallel-parallel*-tegenkoppeling toegepast. Door deze manier van tegenkoppelen wordt de ingangsweerstand van de versterker **groter/kleiner** en tevens de uitgangsweerstand **groter/kleiner**



Op blad 7 hebben we gezien dat bij sterke tegenkoppeling de ingangsspanning van de versterker u_i ongeveer nul is. Dit betekent dat punt P van de schakeling nagenoeg tegen aarde ligt.

De ingangsweerstand tussen de punten A en B is dus: $\boxed{R_i(\text{schakeling}) \simeq R_1}$

De ingangsweerstand zonder tegenkoppeling (R_2 losnemen) is gelijk aan:

$$\boxed{R_i(\text{schakeling}) = R_1 + R_i(\text{versterker})}$$

Ten gevolge van de tegenkoppeling is de ingangsweerstand dus *kleiner* geworden.

VOOR- EN NADELEN VAN TEGENKOPPELEN

We zullen de voor-en nadelen van tegenkoppelen nu eens op een rijtje gaan zetten.

VOORDELEN

1. Door gelijkstroomtegenkoppeling wordt de *gelijkstroominstelling* van een versterker *constanter*. Deze is dan minder afhankelijk van de spreiding van eigenschappen van onderdelen en van temperatuurveranderingen.
2. Door tegenkoppeling wordt de *versterking constanter*.
   Dit is een belangrijk onderdeel waarvan men veel gebruik maakt. Een oscilloscoop-versterker moet bijv. een constante versterking hebben omdat de getallen op de tekstplaat (bij V/div) direct verband houden met de grootte van de versterking. De versterking moet ook op lange termijn gelijk blijven, ook al veranderen de eigenschappen van de toegepaste componenten.

3. Door tegenkoppelen *neemt de lineaire vervorming af.*
Dit betekent dat het frequentie-bereik zowel aan de hoge als aan de lage frequentie-kant toeneemt. Door tegenkoppelen wordt de bandbreedte van de versterker groter. Koppel- en ontkoppelcondensators en parasitaire capaciteiten hebben dus minder invloed op de versterking bij lage resp. hoge frequenties.

4. Door tegenkoppeling *neemt de niet-lineaire vervorming af.*
Versterkt men een sinusvormige signaal, dan zal door tegenkoppeling het uitgangssignaal beter de sinusvorm benaderen.

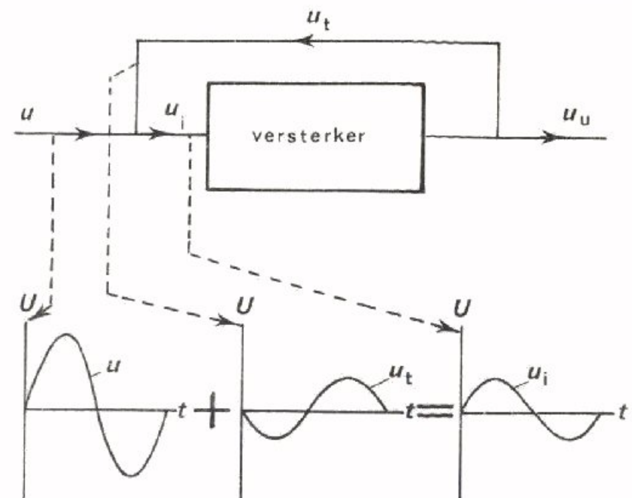
5. Door tegenkoppeling kan men de *ingangs- en uitgangsweerstand* naar gelieve *vergroten of verkleinen.*
De ingangsweerstand van bijv. een oscilloscoop moet zeer hoog zijn om te voorkomen dat bij metingen het meetobject te veel wordt belast. Bij andere versterkers wordt bijv. geeist dat de uitgangsspanning constant blijft bij een wisselende belasting. In dit geval moet de uitgangsweerstand zeer klein zijn. Door tegenkoppeling is dit allemaal te verwezenlijken.

NADEEL

Als nadeel van tegenkoppelen is genoemd het *afnemen van de versterking.* Dat dit inderdaad een nadeel is, kan men als volgt inzien. Met een tweetraps versterker zonder tegenkoppeling kan men bijv. de gewenste verster king A_u = 10 000 halen. Als men gaat tegenkoppelen om de kwaliteit van de versterker te verbeteren neemt de versterking af en wordt de gewenste versterking niet meer gehaald. Om nu toch een versterking van 10 000 te verkrijgen moet men de versterker uit meer dan twee trappen opbouwen. Dit vergt meer componenten waardoor de versterker duurder wordt. Dit is als een nadeel te beschouwen.

SAMENVATTING

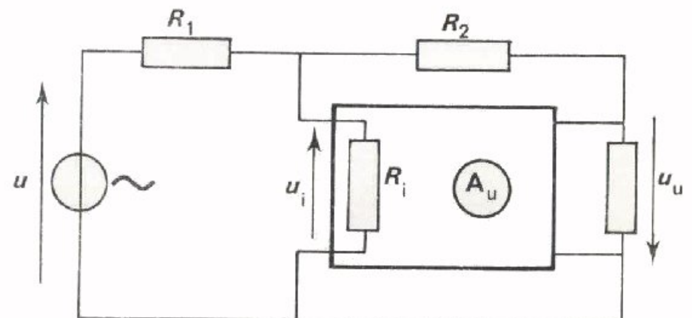
- Bij *terugkoppeling* van een versterker wordt een deel van het uitgangssignaal teruggevoerd naar de ingang.



- Als de fase van het teruggevoerde signaal zodanig is gericht dat het ingangssignaal van de verterker wordt *verkleind*, dan is er sprake van *tegenkoppeling*.

- De parallel-parallel-tegenkoppeling die hiernaast is afgebeeld, wordt veelvuldig toegepast.

$$A_{ut} = \frac{U_{ut}}{U_t} = \frac{R_2}{R_1}$$



- De *tegenkoppelfactor* (F) geeft aan hoeveel maal de versterking ten gevolge van de tegenkoppeling afneemt.

$$F = \frac{A_u}{A_{ut}} \quad \text{of} \quad A_{ut} = \frac{A_u}{F}$$

- Diverse manieren van tegenkoppelen.
  a. Parallel-parallel-tegenkoppeling.
  b. Parallel-serie -tegenkoppeling.
  c. Serie-serie -tegenkoppeling.
  d. Serie-parallel -tegenkoppeling.

- *Voordelen* van tegenkoppeling zijn:
  - Een meer constante gelijkstroominstelling (bij gelijkstroomtegenkoppeling)
  - Een meer constante versterking.
  - Vermindering van lineaire vervorming.
  - Vermindering van niet-lineaire vervorming.
  - De mogelijkheid om de ingangs- en uitgangsweerstand te vergroten of te verkleinen.

  Bij parallel-parallel-tegenkoppeling: R_u kleiner; R_i kleiner.

  Bij parallel-serie -tegenkoppeling: R_u kleiner; R_i groter.

  Bij serie-serie -tegenkoppeling: R_u groter ; R_i groter.

  Bij serie-parallel -tegenkoppeling; R_u groter ; R_i kleiner.

- Het *nadeel* van tegenkoppelen is dat de versterking vermindert.

NAAM:

KLAS:

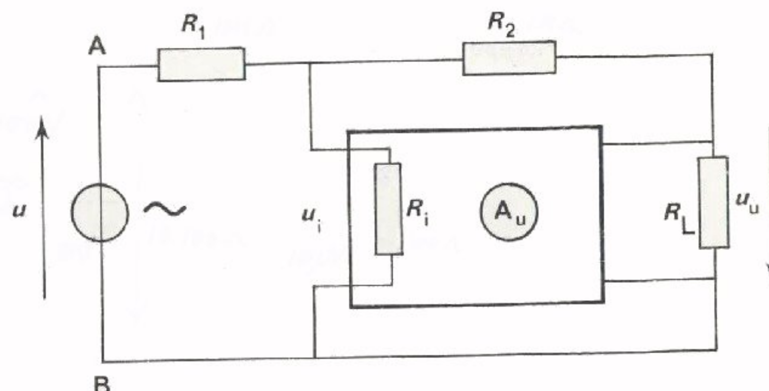
1. Gegeven:

U_{eff} = 7 mV

A_u = -10^5

R_1 = 10 kΩ

R_2 = 1 MΩ



Bepaal:

- De versterking van de schakeling $A_{ut} = \frac{U_{ut}}{U_t}$ ≃
- De uitgangsspanning van de versterker U_{ut} ≃ V
- De ingangsspanning van de versterker U_{it} ≃ µV
- De tegenkoppelfactor F ≃
- De ingangsweerstand tussen A en B R_i ≃ kΩ

2. In bovenstaande schakeling is toegepast:

- O Serie-parallel -tegenkoppeling
- O Parallel-parallel-tegenkoppeling
- O Serie-serie -tegenkoppeling
- O Parallel-serie -tegenkoppeling

- Als R_2 wordt verkleind wordt de tegenkoppeling

  sterker/minder sterk

- Als R_2 wordt verkleind wordt de ingangsweerstand tussen A en B

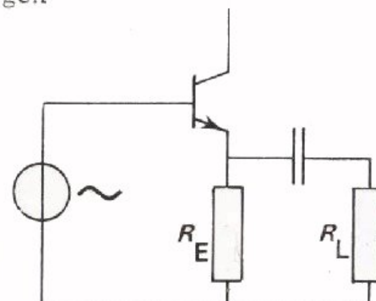
  groter/kleiner

- Als R_2 wordt verkleind wordt de uitgangsweerstand van de schakeling

  groter/kleiner

3. In nevenstaande schakeling is

parallel/serie - **parallel/serie** tegen-koppeling toegepast.



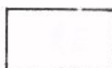
Ten gevolge van de tegenkoppeling wordt:

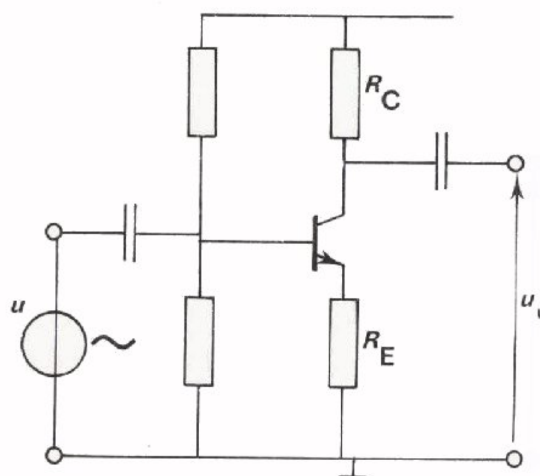
- de ingangsweerstand **groter/kleiner**
- de uitgangsweerstand **groter/kleiner**

4. Van de schakeling volgens bijgaande figuur is gegeven:

S (transistor) = 100 mA/V

R_C = 1 kΩ, R_E = 50Ω

De schakeling is tegengekoppeld door middel van de weerstand 



- Bereken de versterking zonder tegenkoppeling.

A_u =

- Hoe groot is de versterking mét tegenkoppeling ?

A_{ut} =

- Bepaal de tegenkoppelfactor.

F =

Opmerking: de invloed van de koppelcondensators op de versterking mag men verwaarlozen.

5. Als de uitgangsspanning van een versterker afwijkt van de sinusvorm terwijl aan de ingang een sinusvormig signaal wordt toegevoerd, dan spreekt men van **lineaire/niet-lineaire** vervorming.

C 7

VERSTERKERSCHAKELINGEN IV
DIVERSE SOORTEN VERSTERKERS

BELANGRIJKSTE PUNTEN UIT DE VORIGE LES

In de les C6 hebben we het principe van tegenkoppelen behandeld. We hebben gezien hoe men met behulp van tegenkoppelen de eigenschappen van een versterker kan beïnvloeden.

Door tegenkoppelen zal:

- de versterking minder verlopen,
- de lineaire- en niet-lineaire vervorming afnemen,
- de ingangs- en uitgangsweerstand groter of kleiner worden,
- de gelijkstroominstelling minder verlopen (dit geldt alleen bij gelijkstroomtegenkoppeling).

Het belangrijkste nadeel van tegenkoppelen is:

- het verminderen van de versterking.

WAT WE IN DEZE LES GAAN DOEN

In deze les worden de meest voorkomende soorten versterkers onder de loep genomen.

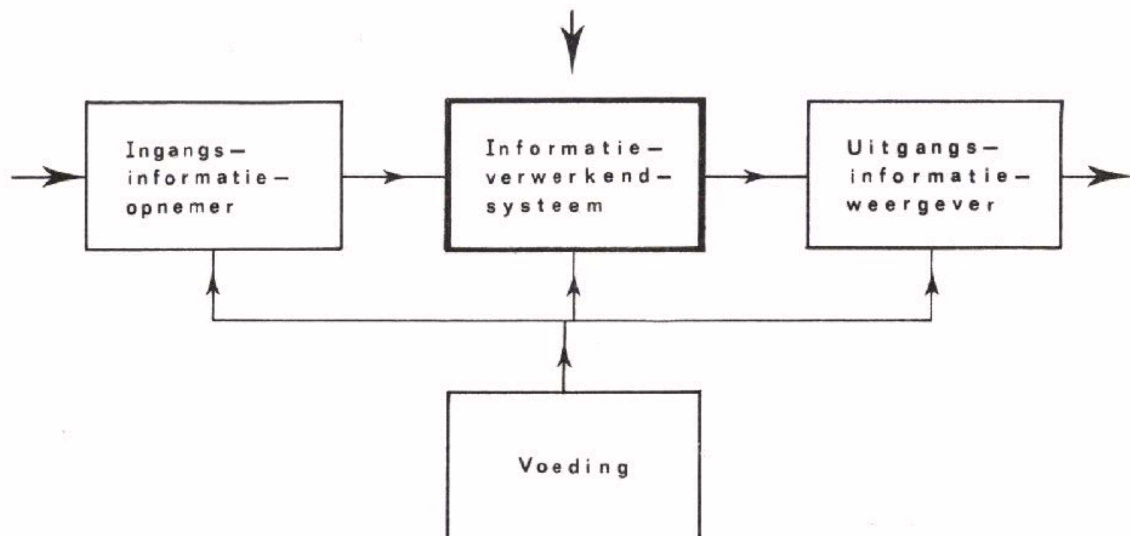
We zullen achtereenvolgens behandelen:

- Versterkers die alleen wisselspanning versterken.
- versterkers die gelijk- en wisselspanning versterken.
- versterkers die alleen gelijkspanning versterker.
- versterkers met een bijzonder groot frequentie-bereik en versterkers met een bijzonder klein frequentie-bereik.

We gaan eens kijken op welke punten deze versterkers verschillen van elkaar. Uitwendig komen de verschillen vooral tot uiting in de amplitude-frequentie-karakteristiek. Inwendig kan men vanzelfsprekend schakeltechnische verschillen onderscheiden. We zullen verder aangeven wat men met iedere versterker kan doen (de functie). Tenslotte bestuderen we enkele in de praktijk gebruikte schakelingen.

TER ORIENTATIE

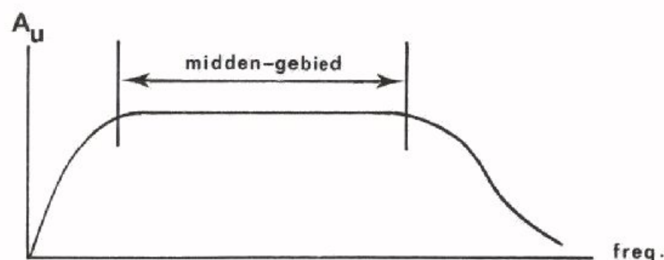
We zijn nog steeds bezig met het onderdeel INFORMATIEVERWERKING.



VERSTERKERS DIE ALLEEN WISSELSPANNING VERSTERKEN

Versterkers die *alleen wisselspanning* verwerken noemt men *wisselspanningsversterkers*. Er zijn ook versterkers die alleen gelijkspanning of gelijk- én wisselspanning verwerken; deze komen in het vervolg van deze les nog aan de orde.

Een wisselspanningsversterking zoals hier wordt bedoeld is uitgebreid behandeld in C5. De amplitude-frequentie-karakteristiek van zo'n versterker is in de volgende figuur nogmaals afgebeeld.



Uit deze karakteristiek kan men zien, dat in een wisselspanningsversterker

- spanningen met de frequentie *nul* (dus gelijkspanningen) niet worden versterkt.
- spanningen met frequenties in het middengebied normaal worden versterkt.
- spanningen met frequenties beneden en boven het middengebied minder worden versterkt.

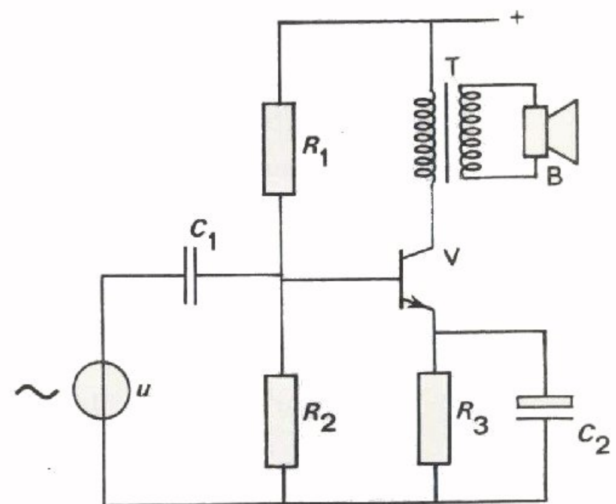
Wisselspanningsversterkers worden bijv. toegepast bij elektronische geluidsopname- en weergave-installaties. In geluidsversterkers behoeven alleen wisselspanningen in het hoorbare frequentiegebied te worden versterkt. Het middengebied van dergelijke versterkers kan beperkt blijven van 20 Hz tot 20 kHz.

OEFENING

Hiernaast is een geluidsversterker afgebeeld.

T = transformator

B = luidspreker



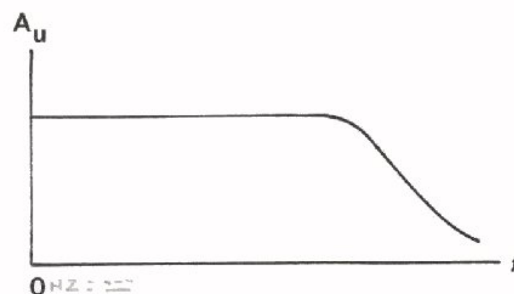
Welke componenten veroorzaken vermindering van versterking bij lage frequenties ?

Welke componenten zijn er de oorzaak van dat gelijkspanningen niet worden versterkt ?

VERSTERKERS DIE GELIJK- EN WISSELSPANNING VERSTERKEN

Versterkers die *gelijk- én wisselspanning* versterken noemt men *gelijkspanningsversterkers*. Gelijkspanningsversterkers zoals hier bedoeld kunnen dus ook wisselspanningen versterken.

Hieronder is de amplitude-frequentie-karakteristiek van een gelijkspanningsversterker afgebeeld.



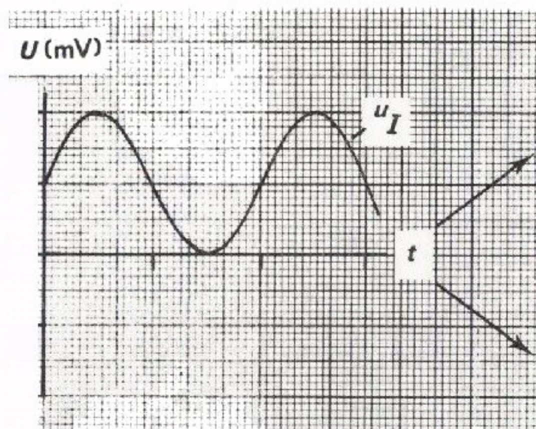
Uit deze grafiek kan men zien, dat met behulp van *gelijk*spanningsversterkers de volgende spanningen kunnen worden versterkt:

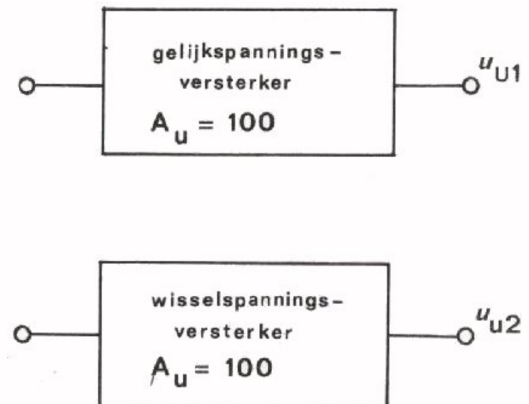
- gelijkspanning
- wisselspanning (ook bij zeer lage frequenties, bijv. 0,01 Hz).
- gelijk- en wisselspanning tegelijk.

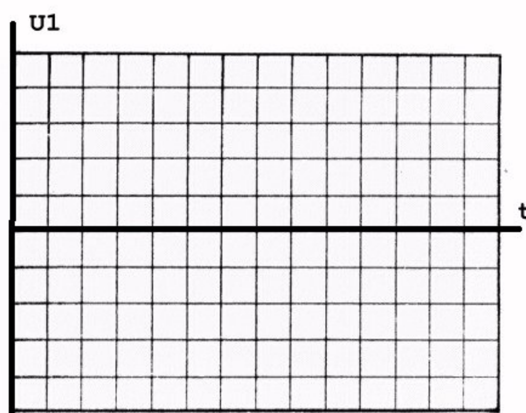
Een voorbeeld van een gelijkspanningsversterker is de Y-versterker van de oscilloscoop waarmee U werkt in de DC-stand. In deze stand kan men zowel gelijk- als wisselspanning meten. In de AC-stand is de Y-versterker als wisselspanningsversterker geschakeld. Nu kan men uitsluitend wisselspanning meten. Op het volgende blad gaan we dit beoefenen.

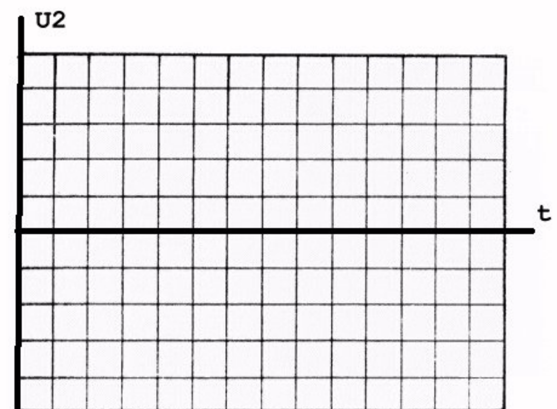
OEFENING

Teken voor onderstaande situatie het verloop van u_{U1} en u_{u2}.









OPDRACHT: HET METEN VAN GELIJK- EN WISSELSPANNING MET EEN OSCILLOSCOOP

1. Meet de maximale gelijkspanning die Uw voedingsapparaat kan leveren. We gebruiken de Y-versterker van de oscilloscoop in de DC-stand.

   - De maximale gelijkspanning is: U = [V]

   - Wat merkt U op als de Y-versterker van de DC- in de AC-stand wordt geschakeld ?

Conclusie: De Y-versterker laat in de AC-stand **wel/geen** gelijkspanning door.

2. Meet de grootste amplitude van een sinusvormige spanning die Uw generator onbelast kan leveren bij 1 kHz. We gebruiken de Y-versterker van de oscilloscoop in de AC-stand.

   - De grootste amplitude van de spanning is U_t = [V]

   - Wat merkt U op als de Y-versterker van de AC- in de DC-stand wordt geschakeld ?

Conclusie: de uitgangsspanning van de generator bevat **wel/geen** gelijkspanning.

OEFENING

U wenst met een oscilloscoop onderstaande spanningen te meten. Vul in of U de Y-versterker als gelijkspanningsversterker (DC) of als wisselspanningsversterker (AC) gebruikt.

1. Een gelijkspanning van een batterij **AC/DC**
2. Een wisselspanning van circa 100 mV op de collector van een transistor (U_{CE} = 10 V). **AC/DC**
3. Een sinusvormige spanning van 0,1 Hz **AC/DC**
4. Een pulserende gelijkspanning. **AC/DC**

GELIJKSPANNINGSKOPPELING EN WISSELSPANNINGSKOPPELING IN VERSTERKERS

In het voorgaande hebben we gezien dat de *uitwendige* verschillen tussen wisselspanningsversterkers en gelijkspanningsversterkers tot uiting komt in de amplitude-frequentie-karakteristiek. De *inwendige* verschillen tussen deze typen versterkers komen hoofdzakelijk tot uiting in de wijze waarop de trappen van de versterker met elkaar zijn gekoppeld.
We onderscheiden: *wisselspanningskoppeling en gelijkspanningskoppeling.*
Bij wisselspanningskoppeling worden twee opeenvolgende versterkertrappen gekoppeld door middel van componenten die uitsluitend wisselspanning doorlaten (zie fig.a.). Als koppel-component gebruikt men meestal een condensator, soms een transformator. Bij gelijkspanningskoppeling bestaat de koppeling tussen twee trappen uit componenten, die zowel gelijkspanning als wisselspanning doorlaten (zie fig.b.). Als koppeling gebruikt men bijv. een weerstand of een directe zogenaamde "galvanische" verbinding.

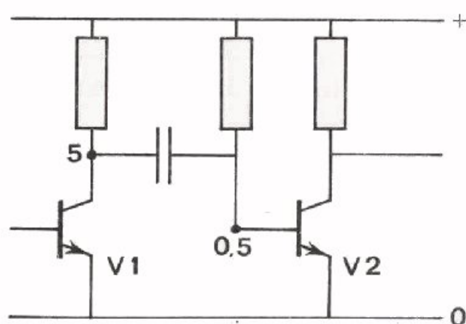


Fig.a

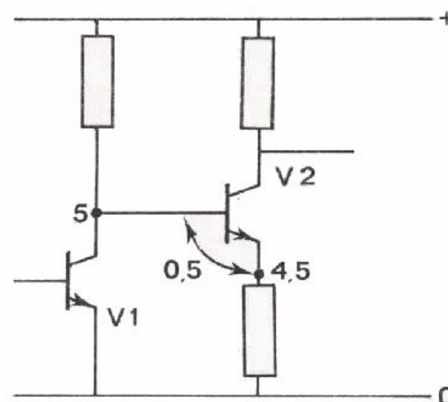


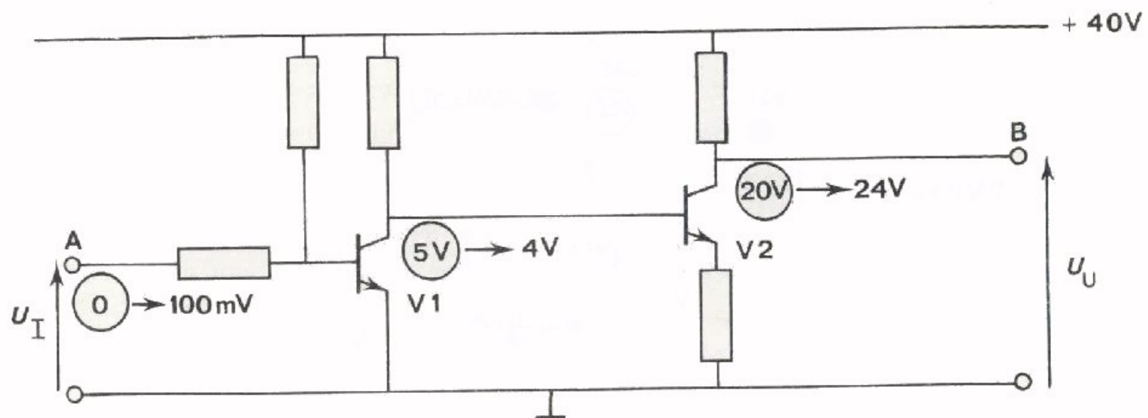
Fig.b

Figuur a geeft het schema van een veel gebruikte wisselspanningskoppeling. De koppelcondensator *C* blokkeert de gelijkspanning van V_1, maar laat de wisselspanning wel door naar V_2. Het blokkeren van de gelijkspanning is in dit geval noodzakelijk omdat de U_{CE} van V_1 bijv. 5 V bedraagt, terwijl de U_{BE} van V_2 bijv. 0,5 V moet zijn. Het meest eenvoudige voorbeeld van een gelijkspanningskoppeling is in figuur b weergegeven. De collector van V_1 is direct verbonden met de basis van V_2. De gelijkspanning op basis van V_2 zou hierdoor veel te hoog worden (5 V i.p.v. 0,5 V). Er is daarom een weerstand in de emitterleiding van V_2 nodig om deze transistor de gewenste U_{BE} te geven. In ons voorbeeld moet over R_E een spanning van 4,5 V vallen om een U_{BE} van 0,5 te verkrijgen.

Een of meer gelijk-spannings-gekoppelde trappen achter elkaar vormen een gelijkspanningsversterker. Een of meer wisselspanningsgekoppelde trappen achter elkaar vormen een wisselspanningsversterker. Er zijn ook wisselspanningsversterkers die zijn opgebouwd uit zowel gelijkspanningsgekoppelde als wisselspanningsgekoppelde trappen. Op pagina 10 komt zo'n versterker aan de orde.

HOE KOMT GELIJKSPANNINGSVERSTERKING TOT STAND?

In de les C5 is uitgebreid behandeld hoe wisselspanningsversterking plaats vindt. We zullen nu aan de hand van een eenvoudig getallenvoorbeeld laten zien hoe gelijkspanningsversterking tot stand komt.



In bovenstaande gelijkspanningsversterker gaan we eerst de ingangsklemmen kortsluiten (U_I= 0). We veronderstellen dat de daarbij optredende gelijkspanningen een waarde hebben zoals in de figuur omcirkeld. Daarna zetten we een gelijkspanning van bijv. 100 mV op de ingang van de versterker, zodanig dat punt A positief wordt t.o.v. aarde (zie figuur). Hierdoor wordt de basis van V_1 ook positiever, zodat de collectorstroom van V_1 toeneemt, Het gevolg hiervan is, dat de U_{CE} van V_1 daalt van bijvoorbeeld 5 V naar 4 V. De uitgangsspanning van de eerste trap daalt dus 1 V als de ingangsspanning 100 mV = 0,1 V stijgt.

De gelijkspanningsversterking van de eerste trap is dus:

$$A_u = \frac{1}{0,1} = 10.$$

Verder is de uitgangsspanningverandering tegengesteld aan de verandering van de ingangsspanning.

De spanningsdaling van de eerste trap wordt doorgegeven aan de basis van V_2. Hierdoor vermindert de collectorstroom van V_2, waardoor de collectorspanning stijgt. U_{CE} van V_2 stijgt bijvoorbeeld van 20 V naar 24 V. De uitgangsspanning op punt B wordt dus 4 V positiever als de ingangsspanning op punt A 100 mV positiever wordt.

De gelijkspanningsversterking van de totale versterker is dus: [ ]

De uitgangsspanningsverandering is **niet/wel** tegengesteld aan de ingangsspanningsverandering.

Als we aannemen dat de versterking onafhankelijk is van de grootte van de te versterken spanning (en dit is te bereiken door tegenkoppeling), zal bij een ingangsspanning van 50 mV de uitgangsspanning 2 V in plaats van 4 V veranderen. Als we de ingangsspanning 50 mV negatief maken ten opzichte van aarde, zal de uitgangsspanning 2 V lager worden in plaats van hoger.

ANDERE UITVOERINGSVORMEN VAN GELIJKSPANNINGSKOPPELING

De directe gelijkspanningskoppeling tussen de collector van de ene transistor en de basis van de volgende (zie vorige blad) heeft de volgende nadelen.

1. De versterking van de 2e trap is gering, omdat tegenkoppeling ontstaat ten gevolge van de noodzakelijke emitter-weerstand van V_2.
2. Er is een hoge voedingsspanning nodig, vooral als het aantal trappen groot is. Immers de collectorspanning van iedere trap moet hoger zijn dan de collectorspanning van de voorgaande trap. Dit is zo, omdat de basisspanning van elke versterkertrap gelijk is aan de collectorspanning van de voorgaande trap.

De volgende schakelingen hebben in dit opzicht betere eigenschappen.

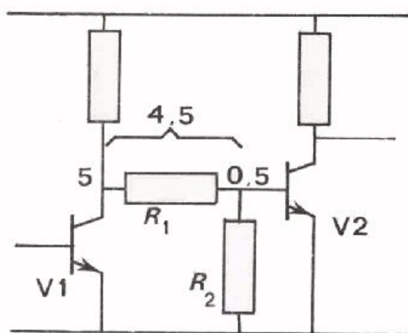


Fig. a

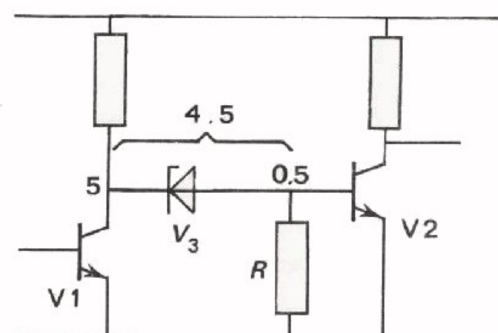


Fig. b

In de schakeling volgens fig. a wordt de gewenste basisspanning verkregen d.m.v. de spanningsdeler R_1 en R_2. De waarden van R_1 en R_2 zijn zodanig gekozen dat U_{BE} van V_2 bijv. 0,5 V wordt. Het onder punt 2 genoemde nadeel is hiermee vervallen. Het nadeel van de geringe versterking blijft, omdat de spanningsdeler ook een verzwakking van het te versterken signaal veroorzaakt.

Hoe groot is deze verzwakking ? [ ]

Betere resultaten verkrijgt men met de koppelmethode volgens fig.b. De zenerdiode V_3 is m.b.v. de weerstand R in het zenergebied ingesteld. U dient te weten dat er dan over de diode een constante gelijkspanning valt. Veronderstel dat de zenerspanning 4,5 V is. Bij een collectorspanning van V_1 van 5 V wordt de U_{BE} van V_2 0,5 V. Ondanks deze gelijkspanningsdeling van 10 : 1 zal deze koppel-methode toch geen versterkings-vermindering teweeg brengen. We weten immers dat de spanning over een zenerdiode vrijwel niet kan variëren. Als de collectorspanning van V_1 bijv. 0,1 V verandert dan zal deze verandering nagenoeg volledig worden doorgegeven aan de basis van V_2.

Met behulp van de schakeling volgens fig. b zijn onder punt 1 ēn 2 genoemde nadelen dus verholpen.

HET VERKRIJGEN VAN NUL VOLT AAN DE UITGANG VAN EEN GELIJKSPANNINGSVERSTERKER BIJ KORTGESLOTEN INGANG

Het nadeel van voorgaande schakelingen is dat bij een ingangsspanning van 0 V (kortgesloten ingang) de uitgangsspanning niet gelijk is aan 0 V. De uitgangsspanning is immers gelijk aan de U_C van de laatste transistor. (In de schakeling van blad 7 was U_C = 20 V bij U_I = 0 V). Bij de volgende schakelingen is dit bezwaar verholpen.

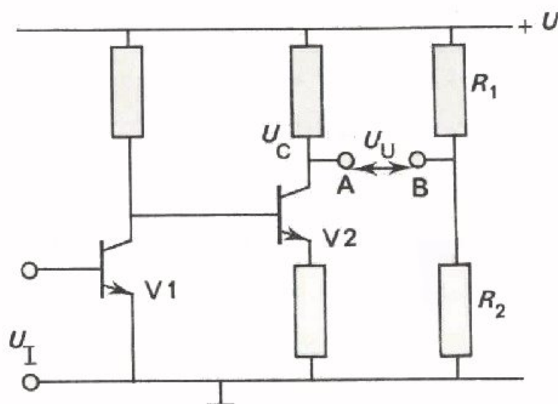


Fig. a

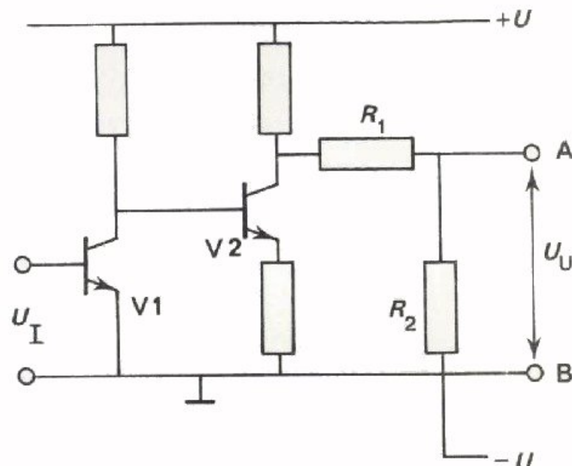


Fig. b

In fig. a wordt er via de spanningsdeler R_1 en R_2 een gelijkspanning verkrege die gelijk is aan U_C bij U_I= 0 V. De uitgang van de versterker bevindt zich hier tussen de collector van V_2 en de aftakking van de spanningsdeler. Bij een juiste keuze van R_1 en R_2 zal de uitgangsspanning 0 V zijn (bij een ingangsspanning van 0 V). Als nu aan de ingang van de versterker een gelijkspanning wordt aangesloten, dan stijgt of daalt de spanning op punt A; de spanning op punt B blijft constant.

Als we veronderstellen dat in fig. a V_1 en V_2 samen 40x versterken dan kunnen we constateren:

- Bij U_I = 100 mV (positief t.o.v. aarde) wordt U_U = [V]

  waarbij punt A **positief/negatief** t.o.v. punt B is.

- Bij U_I = 20 mV (negatief t.o.v. aarde) wordt U_U = [V]

  waarbij punt A **positief/negatief** t.o.v. punt B is.

Het bezwaar van de schakeling van fig. a is, dat de uitgang geen gemeenschappelijk punt heeft met de ingang. De uitgang ligt namelijk niet aan aarde. In de schakeling volgens fig. b is dit opgelost m.b.v. een extra gelijkspanning. De collector van V_2 is via een spanningsdeler verbonden met een negatieve gelijkspanning. Men heeft de waarden van R_1 en R_2 zo gekozen dat bij U_I = 0 V ook de uitgangsspanning 0 V is.

Bij een positieve U_I wordt punt A **positief/negatief** t.o.v. B.

Bij een negatieve U_I wordt punt A **positief/negatief** t.o.v. B.

Bijna iedere gelijkspanningsversterker heeft een nulpuntscorrectie zoals hierboven beschreven. Eén van de weerstanden van de spanningsdeler is dan variabel uitgevoerd. Vóór het gebruik van de versterker regelt men deze weerstand zodanig dat bij kortgesloten ingangsklemmen de uitgangsspanning 0 V is.

GELIJKSPANNINGSDRIFT

In het voorgaande hebben we gezien dat een gelijkspanningsversterker meer mogelijkheden biedt dan een wisselspanningsversterker. Hieruit zouden we de conclusie kunnen trekken dat wisselspanningsversterkers overbodig zijn; met een gelijkspanningsversterker kan men immers óók wisselspanning versterken.

Desondanks maakt men in de praktijk veelvuldig gebruik van wisselspanningsversterkers. Enerzijds omdat het soms gewenst is dat wél de wisselspanning maar niet de gelijkspanning wordt versterkt. Anderszijds omdat bij gelijkspanningsversterkers het hinderlijke verschijnsel "gelijkspanningsdrift" kan optreden.

Onder *gelijkspanningsdrift* verstaat men het verloop van de uitgangsspanning van een gelijkspanningsversterker, terwijl de toegevoerde ingangsspanning constant is. Dit verloop kan veroorzaakt worden door temperatuur- en voedingsspanningsvariaties.

Stel dat de gelijkspanningsinstelling van de 1e trap van een gelijkspanningsversterker 10 mV verandert ten gevolge van een temperatuurverhoging. Dit gelijkspanningsverloop wordt doorgegeven aan de 2e trap en hierin bijv. 100x verhoogd. Op de uitgang van de 2e trap verandert de spanning dan 100 x 10 mV = 1 V. De uitgangsspanning van deze tweetrapsversterker verandert dus 1 V, ondanks dat de toegevoerde ingangsspanning constant is.

De "drift" van een gelijkspanningsversterker geeft men op in µV op de ingang. Als door de drift de *uit*gangsspanning bijv. 1 V varieert bij een versterking van 10 000, dan zegt men dat de drift $\frac{1\ V}{10\ 000} = 100\ \mu V$ is.
Een versterker waarvan de uitgangsspanning 1 V varieert bij een versterking van 100 000 is aanzienlijk beter. De drift van deze versterker is:

µV

In publicaties over gelijkspanningsversterkers maakt men vaak onderscheid tussen de drift tengevolge van voedingsspanningsvariaties en die tengevolge van temperatuurvariaties.
Drift door voedingsspanningsvariaties geeft men op in µV/V, bijv. 20 µV/V.
Drift door temperatuurvariaties in µV/°C, bijv. 5 µV/°C.

"Drift" kan men tot een minimum beperken door:

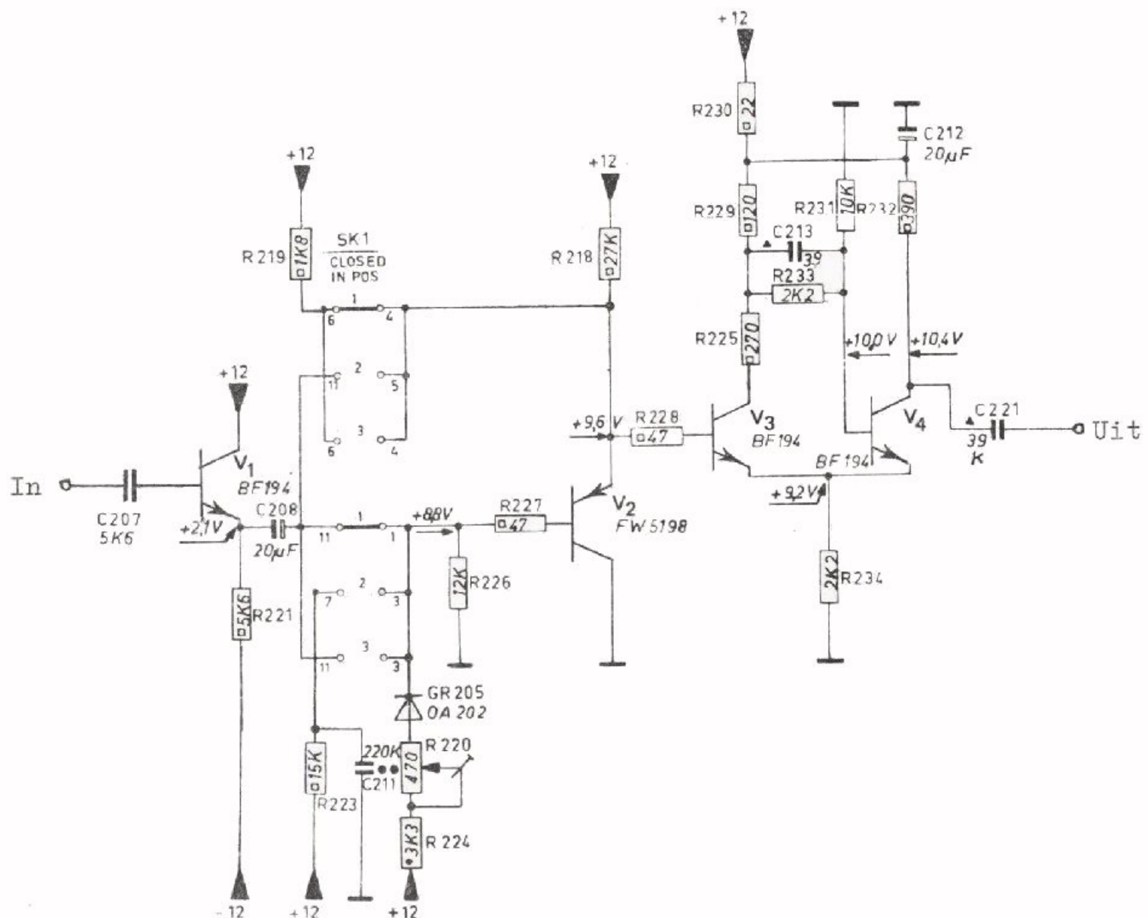
- het toepassen van tegenkoppeling.
  In de vorige les hebben we geleerd dat een tegengekoppelde versterker minder verloopt ten gevolge van temperatuur- en voedingsspanningsvariaties.
- het toepassen van symmetrische schakelingen.
  Deze schakelingen zijn zo samengesteld, dat het verloop van het ene deel van de versterker wordt opgeheven door een even groot verloop van het andere deel. Hierop komen we in de volgende les terug.

OPMERKING

Bij wisselspanningsversterkers kan geen gelijkspanningsdrift optreden, omdat de koppelcondensators die tussen de trappen zijn geschakeld geen langzame gelijkspanningsvariaties doorlaten.

EEN PRAKTISCHE VERSTERKER

Onderstaand schema is een deel van de X-versterker van een oscilloscoop. In deze versterker zijn een aantal trappen gelijkspanningsgekoppeld en een aantal wisselspanningsgekoppeld.



- Tussen welke trappen is gelijkspanningskoppeling toegepast ?

Tussen:

V..........	en	V..........
V..........	en	V..........

- Tussen welke trappen is wisselspanningskoppeling toegepast ?

Tussen:

V..........	en	V..........
....		

- Welke zijn de koppelcondensators in de versterker ?

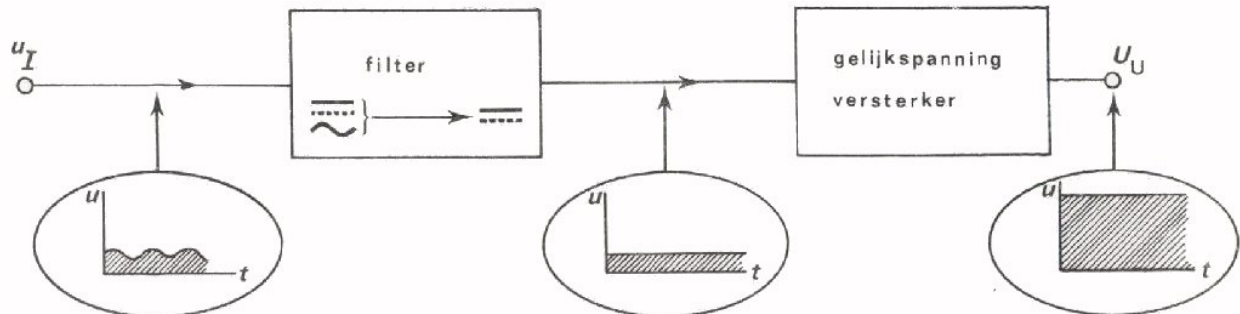
C.........., C..........,

- Bovenstaande versterker in zijn geheel is een:

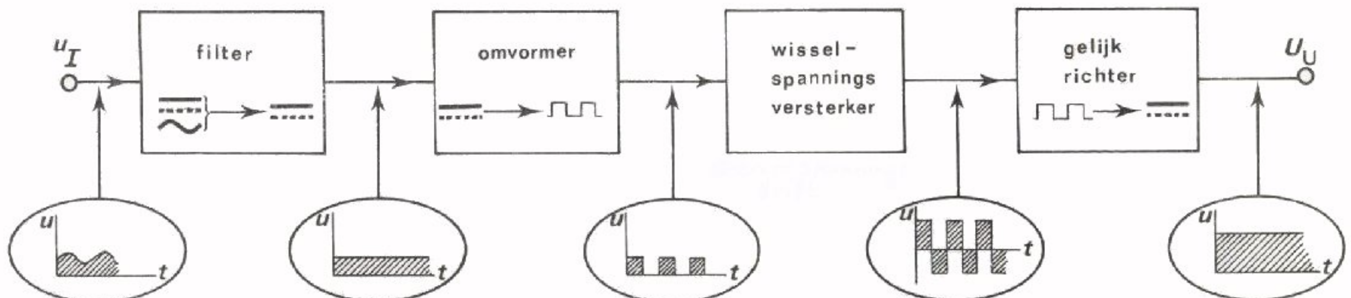
gelijkspanningsversterker/wisselspanningsversterker

VERSTERKERS DIE ALLEEN GELIJKSPANNING VERSTERKEN

Als men uitsluitend gelijkspanning wil versterken, ligt het voor de hand een gelijkspanningsversterker te gebruiken en hierbij maatregelen te nemen dat wisselspanning niet wordt doorgelaten. Dit kan worden verwezenlijkt door vóór de gelijkspanningsversterker een filter op te nemen dat gelijkspanning doorlaat en wisselspanning blokkeert (zie figuur). Dergelijke filters worden in een van de volgende lessen bij de functie "verzwakken" behandeld.



Bovenstaande schakeling is niet geschikt om zeer kleine gelijkspanningen te versterken. Als men bijv. een gelijkspanning van 10 µV wil versterken, is het te begrijpen dat men hiervoor geen gelijkspanningsversterker met een drift van 10 µV of meer kan gebruiken. De uitgangsspanning zou dan immers ten gevolge van de drift evenveel veranderen als ten gevolge van de te versterken spanning. Voor het versterken van kleine gelijkspanningen (10 µV of lager) gebruikt men zogenaamde chopper-versterkers (lees: tsjopper-versterkers). De naam "chopper" (engels woord voor hakker, kapper) zal U duidelijk worden als we het blokschema van de versterker bekijken.



Een filter aan de ingang zorgt ervoor dat alleen gelijkspanning wordt doorgelaten. Deze gelijkspanning wordt in een omvormer in stukjes "gehakt" tot een pulserende gelijkspanning. Hoe dit gebeurt krijgen we later bij het bespreken aan de functie "omvormen". Het is bekend dat zo'n pulserende gelijkspanning is samengesteld uit een zuivere gelijkspanning en een blokvormige wisselspanning. De gelijkspanning wordt in de wisselspanningsversterker geblokkeerd; de wisselspanning wordt versterkt. Na versterking volgt weer een omzetting van de wisselspanning in een gelijkspanning. Zo hebben we een versterking van gelijkspanning verkregen "zonder gebruik te maken van een gelijkspannings-versterker". Bij een chopper-versterker heeft men dus ook geen last van gelijkspanningsdrift.

VERSTERKERS MET EEN BIJZONDER GROOT FREQUENTIE-BEREIK EN VERSTERKERS MET EEN BIJZONDER KLEIN FREQUENTIE-BEREIK

Versterkers met een groot frequentie-bereik noemt men *bredeband*versterkers. Er is sprake van een groot frequentie-bereik als de *verhouding* tussen de hoogste en de laagste frequentie van het doorlaatgebied van een versterker zeer groot is. In fig. a is de amplitude-frequentie-karakteristiek van een bredeband-versterker getekend. Bij deze versterker is die verhouding:

$$\frac{10.10^6}{10} = 10^6$$

De Y-versterkers die men in oscilloscopen toepast zijn bijna altijd bredeband-versterkers.

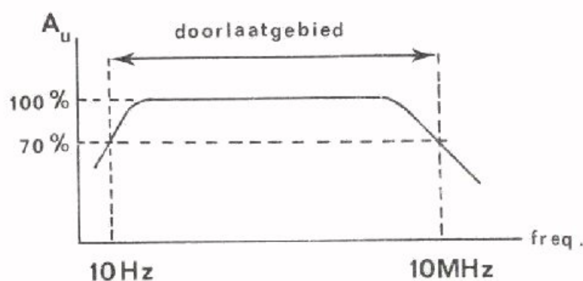


Fig. a

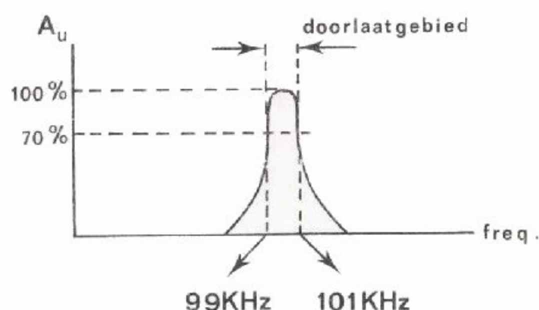


Fig. b

Versterkers met een klein frequentie-bereik noemt men *selectieve* versterkers. Er is sprake van een klein frequentie-bereik als de *verhouding* tussen de hoogste en de laagste frequentie van het doorlaatgebied van een versterker iets groter dan 1 is. In fig. B is de amplitude-frequentie-karakteristiek van een selectieve versterker afgebeeld. Bij deze versterker is genoemde verhouding:

$$\frac{101.10^3}{99.10^3} \simeq 1,02$$

De selectieve versterker, waarbij deze grafiek hoort, kiest of *selecteert* die spanningen waarvan de frequentie ligt tussen 99 kHz en 101 kHz. Spanningen met andere frequenties worden nagenoeg niet versterkt. Bij selectieve versterkers behoeft de bandbreedte niet altijd klein te zijn. Een versterker die een frequentie-gebied van bijv. 900 MHZ tot 920 MHz doorlaat is een selectieve versterker:

$$\frac{920.10^6}{900.10^6} \approx 1,02$$

De bandbreedte is hier evenwel 20 MHz. Dit is veel groter dan de bandbreedte van de bredeband-versterker behorende bij fig. a.

Selectieve versterkers worden veel toegepast in radio- en TV-ontvangers, Een groot aantal zenders zenden radio- en TV-programma's uit. Elke heeft zijn eigen zendfrequentie. Met behulp van de selectieve versterkers waarmee de ontvangers zijn uitgerust, wordt uit de vele programma's het gewenste programma gekozen of geselecteerd. De andere zenders komen niet of nauwelijks door.

VERSCHILLEN TUSSEN EEN BREDEBAND-VERSTERKER EN EEN SELECTIEVE VERSTERKER

Inwendig kan men de volgende verschillen tussen een bredeband-versterker en een selectieve versterker onderscheiden. Bij *bredeband*-versterkers zijn maatregelen genomen om de amplitude-frequentie-karakteristiek zowel aan de lage frequentie-kant als aan de hoge kant zover mogelijk te laten doorlopen.

In een van de vorige lessen hebben we geleerd dat voor een goede versterking bij *lage* frequenties grote koppel- en ontkoppelcondensators nodig zijn. In het begin van deze les hebben we gezien dat we ook versterkers zonder koppel- en ontkoppelcondensators kunnen maken. We krijgen dan een gelijkspanningsversterker waarvan de amplitude-frequentie-karakteristiek doorloopt tot 0 Hz.

Voor een goede versterking bij *hoge* frequenties moet men de parasitaire capaciteiten aan de versterkeronderdelen tot een minimum beperken. Men gebruikt dan ook capaciteits-arme onderdelen, HF-transistors en korte verbindingen.

Selectieve versterkers kan men herkennen aan de banddoorlatende filters die hierin toegepast worden. Meestal gebruikt men *LC*-filters in de vorm van resonantiekringen. In onderstaande figuren zijn twee selectieve versterkertrappen getekend.

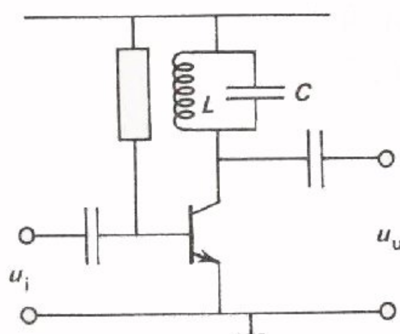


Fig. a

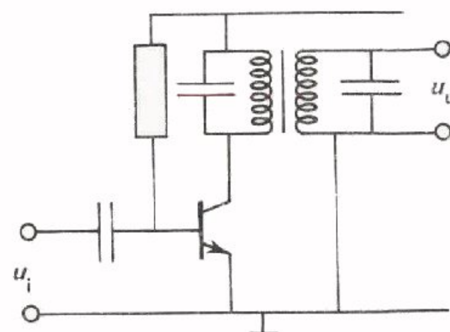
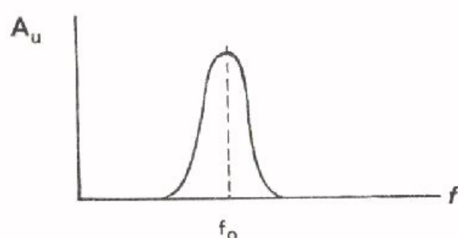
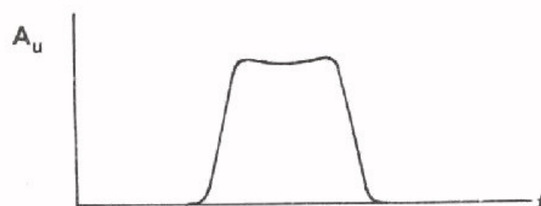


Fig. b

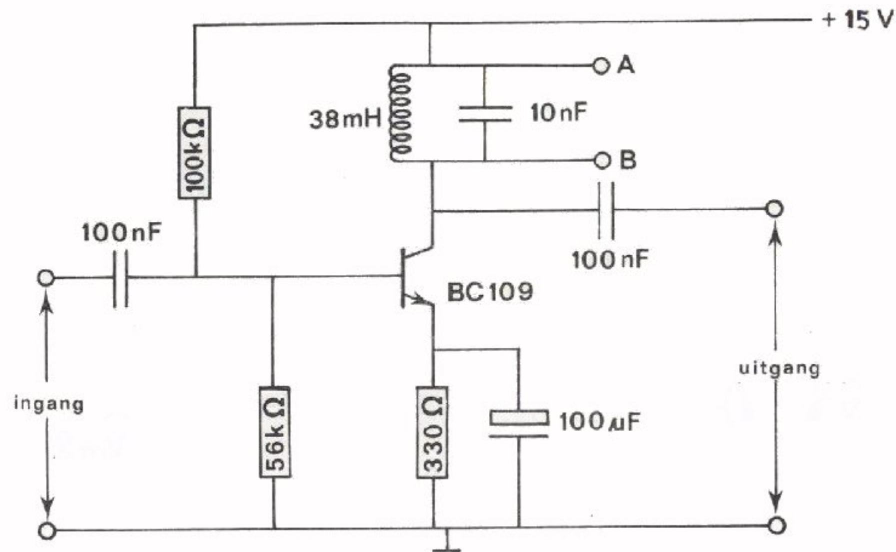




De schakeling volgens figuur a bevat een parallel-resonantiekring in het collectorcircuit van een transistor. Zoals we weten is de impedantie Z van de kring maximaal bij de resonantiefrequentie f_0. Onder en boven f_0 wordt Z aanmerkelijk kleiner. De versterking A_u van deze versterkertrap is gelijk aan $S.Z$. Het verloop van de amplitude-frequentie-karakteristiek van de versterkertrap hangt dus af in hoofdzaak van de eigenschappen van de resonantiekring.

Figuur b geeft een schakeling waarin een zogenaamde bandfilter is opgenomen. Een bandfilter bestaat uit twee parallelkringen met dezelfde resonantiefrequentie die zeer los met elkaar zijn gekoppeld. Het effect hiervan is dat de amplitude-frequentie-karakteristiek een vlakke top krijgt. Dit precies te verklaren voert te ver voor deze cursus.

OPDRACHT: HET METEN AAN EEN SELECTIEVE VERSTERKER



- Bouw bovenstaande schakeling op Uw paneel.
  Houd op Uw paneel ruimte over om tussen de punten A en B nog een weerstand of een condensator te kunnen schakelen.
- Sluit een voedingsspanning van 15 V aan. Leg de "-" van de voeding aan aarde.
- Voer een sinusvormige spanning u_i toe aan de ingang van de versterker.
  Zorg voor U_{it} = 3 mV (aflezen op generator); $f \simeq 8$ kHz.
- Sluit de oscilloscoop aan op de uitgang.
- Regel de frequentie van de generator tot de uitgangsspanning van de versterker maximaal is. Noteer daarna de frequentie van de generatorspanning. Deze is:

  f_o = [kHz]
- Bereken de resonantie-frequentie van de LC-kring met behulp van de gegevens L = 38 mH en C = 10 nF.
  U vindt:

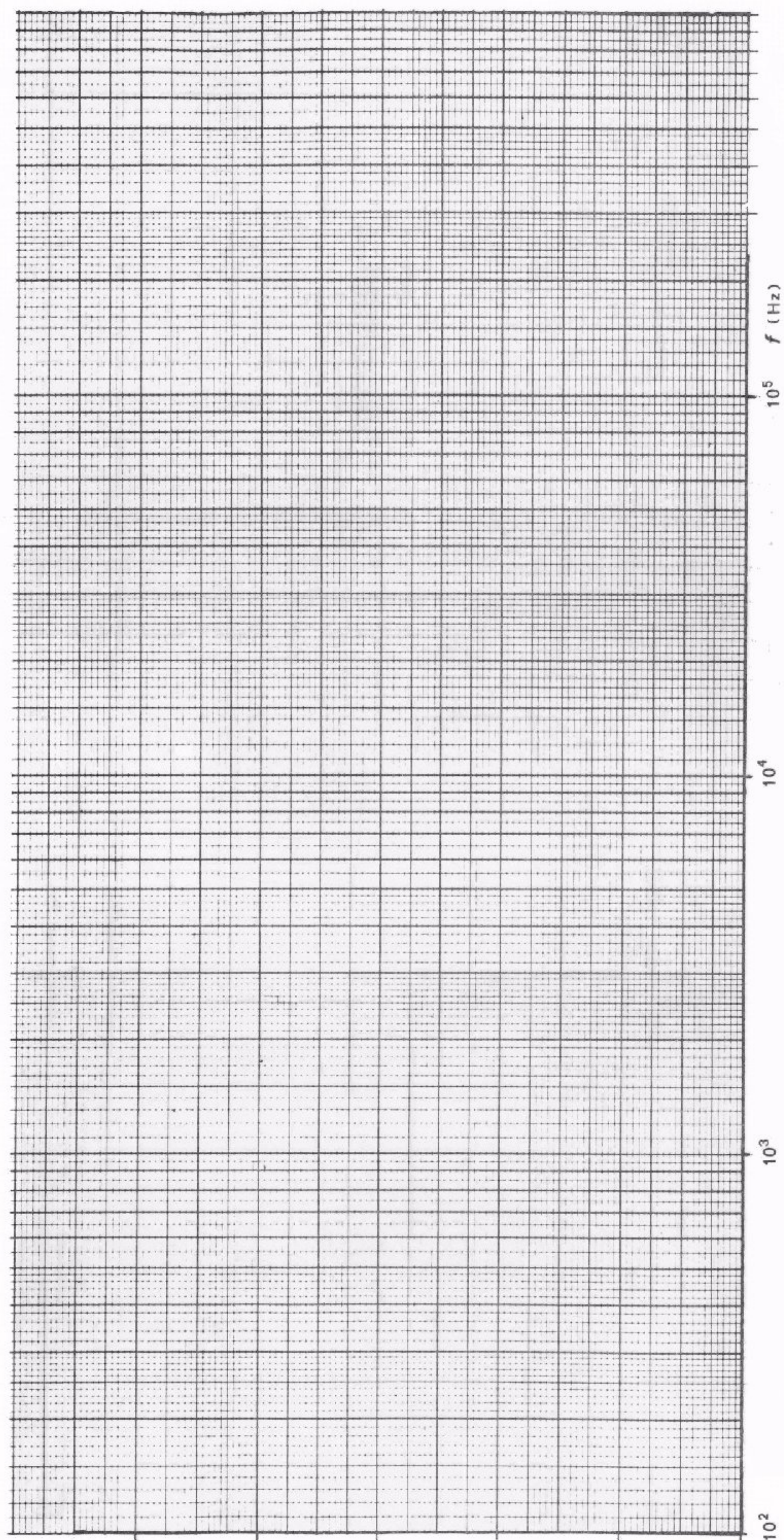
  $$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L.C}} = \text{[kHz]}$$
- Het meetresultaat en het rekenresultaat dienen ongeveer met elkaar overeen te komen. Met andere woorden: de frequentie waarbij maximale uitgangsspanning optreedt komt overeen met de resonantie-frequentie van de LC-kring.

- Meet de uitgangsspanning in de buurt van f_o bij onderstaande frequenties. Noteer de resultaten in kolom 1.

Frequentie	Uitgangsspanning	
	Kolom 1	Kolom 2
	U_{ut} (Volt)	U_{ut} (Volt)
f_o		
f_o + 200 Hz		
f_o - 200 Hz		
f_o + 600 Hz		
f_o - 600 Hz		
f_o + 1 kHz		
f_o - 1 kHz		
f_o + 2 kHz		
f_o - 2 kHz		

- Zet de meetresultaten uit in een grafiek. Gebruik het grafiekenpapier van blad C07.19.
- De versterking bij f_o is: A_{u1} = [ ]
- De bandbreedte van de versterker is: B_1 = [ ] kHz
- Schakel een weerstand van 15 kΩ (10 kΩ en 4,7 kΩ in serie) over de kring tussen de punten A en B (zie de figuur op het vorige blad).
- Meet opnieuw de uitgangsspanning in de buurt van f_o. Noteer de resultaten in kolom 2.
- Zet ook deze meetresultaten uit op blad C07.19.
- Uit de 2e meting blijkt: f_o = [ ] kHz
- De versterking bij f_o is nu A_{u2} = [ ]
- De bandbreedte is nu B_2 = [ ] kHz
- Schakel een condensator van 33 nF parallel aan de kring. Verwijder R = 15 kΩ.
- Bepaal opnieuw de frequentie waarbij maximale versterking optreedt.

f_{o2} = [ ] kHz


10^2
10^3
10^4
10^5
f (Hz)

CONCLUSIES UIT DE METINGEN

- Het verloop van de amplitude-frequentie-karakteristiek van de selektieve versterker wordt voor een belangrijk deel bepaald door de eigenschappen van de *LC*-kring.

  Immers:

  - De frequentie waarbij maximale spanningsversterking optreedt komt overeen met de resonantie-frequentie van de *LC*-kring.
  - De vermindering van versterking bij frequenties hoger en lager dan f_o komt overeen met de vermindering van de impedantie van de kring bij die frequenties.
  - Als we de impedantie van de kring verkleinen door de kring met een weerstand te belasten, vermindert ook de versterking.
  - Als we de kring verstemmen door deze met een condensator te belasten verschuift het doorlaatgebied van de versterker.

- Bij een van de metingen werd een condensator van 33 nF parallel aan de kring geschakeld. Hierdoor werd de kringcapaciteit ongeveer 4 x zo *groot* en de f_o van de versterker 2x zo *klein*.

  Dit blijkt ook uit de formule: $f_o = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$. Ga dit zelf na.

- Evenals bij de bredeband-versterkers is er bij selectieve versterkers ook een verband tussen bandbreedte en versterking. We gaan dit na aan de hand van de meetresultaten. Als we de kring niet belasten met een weerstand, dan is:

De versterking bij f_o	A_{u1} =	
De bandbreedte	B_1 =	kHz
	$B_1 \times A_{u1}$ =	

Als we de kring belasten met R = 15 kΩ, dan is:

De versterking bij f_o	A_{u2} =	
De bandbreedte	B_2 =	kHz
	$A_{u2} \times B_2$ =	

Uit bovenstaande blijkt dat ook hier bij benadering geldt:

bandbreedte x versterking ≈ constant

Hieruit volgt dat bij selectieve versterkers een zeer grote versterking mogelijks is.

OEFENING

Als we in een selectieve versterker de capaciteit van de *LC*-kring 9x kleiner maken, dan wordt de f_o van de versterker [ ] -maal

hoger/lager

SAMENVATTING

- Aan de hand van de amplitude-frequentie-karakteristiek van versterkers kan men de volgende versterkertypen onderscheiden:
  - gelijkspanningsversterkers
  - wisselspanningsversterkers
  - chopperversterkers
  - bredeband-versterkers
  - selectieve versterkers
- Met behulp van gelijkspanningsversterkers kan men versterken:
  - gelijkspanning; geen bijzondere kleine spanningen;
  - wisselspanning; ook bij zeer lage frequenties.
  - gelijk- en wisselspanning tegelijk.
- Wisselspanningsversterkers kunnen uitsluitend wisselspanning versterken, niet wisselspanningen met zéér lage frequenties.
- Chopperversterkers zijn bijzonder geschikt voor het versterken van zéér kleine gelijkspanningen.
- Bij bredeband-versterkers is de verhouding van de hoogte tot de laagste frequentie waarbij versterking optreedt bijzonder groot.
- Bij selectieve versterkers is de verhouding van de hoogste tot de laagste frequentie, waarbij een versterking optreedt klein ($\simeq$ 1).
- Zowel voor bredeband-versterkers als selectieve versterkers geldt bij benadering: $A_u \times B \simeq$ constant.
- Als met behulp van een gelijkspanningsversterker kleine gelijkspanningen moeten worden versterkt, kan men last hebben van gelijkspanningsdrift. "Gelijkspanningsdrift" is het verloop van de gelijkstroominstelling. Hierdoor verandert de uitgangsgelijkspanning, terwijl de te versterken ingangsgelijkspanning constant blijft.
  Gelijkspanningsdrift drukt men uit in µV aan de ingang.

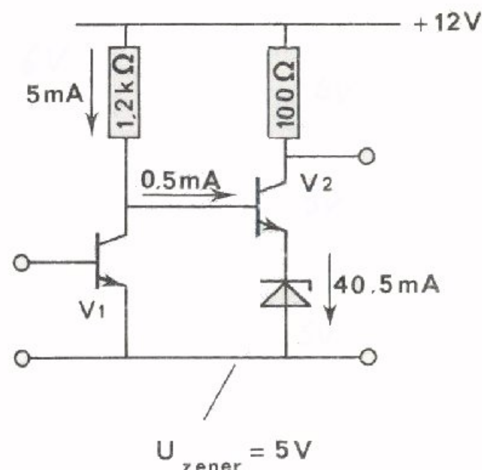
$$\text{Gelijkspanningsdrift} = \frac{\text{Verloop aan de uitgang}}{\text{versterking}}$$

- Men kan aan de schakeling zien met welk soort versterker men heeft te doen:
  - Bij gelijkspanningsversterkers worden geen koppel- en ontkoppel-condensators toegepast.
  - In wisselspanningsversterkers worden de diverse trappen verbonden via condensators of transformators.
  - In chopperversterkers kan men een wisselspanningsversterking en omvormers onderscheiden.
  - Bij bredeband-versterkers past men capaciteits-arme onderdelen en verbindingen toe.
  - In selectieve versterkers gebruikt men banddoorlatende netwerken.

NAAM: [ ] KLAS: [ ]

OEFENINGEN:

1. Nevenstaande schakeling is die van een:



- o wisselspanningsversterker
- o selectieve versterker
- ● gelijkspanningsversterker
- o chopper-versterker

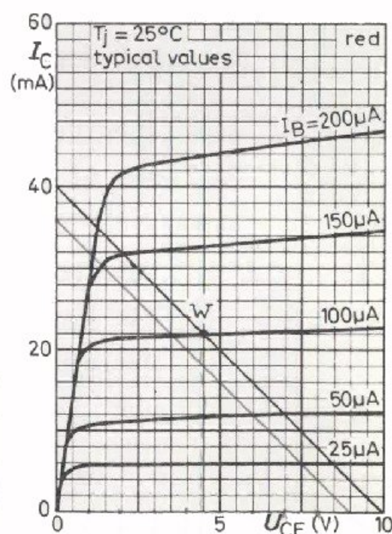
Vul de volgende spanningen in:

$U_{CE}(V_1)$ = [ ] V

$U_{BE}(V_2)$ = [ ] V

$U_{CE}(V_2)$ = [ ] V

2, Hiernaast zijn de uitgangsgrafieken van een transistor afgebeeld. De transistor is als versterker geschakeld met een weerstand in de collectorleiding. Van deze weerstand is in bijgaande grafiek de belastingslijn getekend.



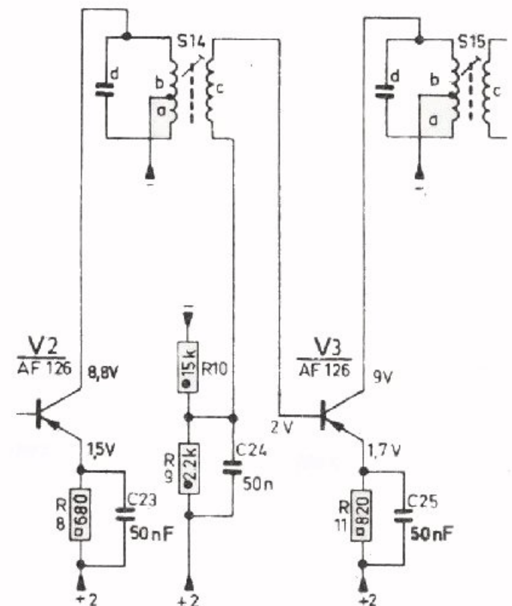
Bepaal aan de hand van de belastingslijn:

- - de voedingsspanning U_B = [ ] V
- de collectorweerstand R_C = [ ] Ω
- de U_{CE} van de transistor U_{CE}= [ ] V

- Als de voedingsspanning 1 V lager wordt, hoeveel verandert dan de U_{CE} van de transistor ? (U mag aannemen dat I_B constant blijft).

De verandering van U_{CE} = [/] V

3. De schakeling volgens nevenstaande figuur is een:



- o bredeband- versterker
- o selectieve versterker
- o gelijkspanningsversterker

De koppeling tussen V_2 en V_3 komt tot stand via een:

- o weerstand
- o condensator
- o transformator

De resonantiekringen in de collectorleidingen zijn beide afgestemd op 450 kHz. De versterking bij 450 kHz is 100x per trap.

- De totale versterking bij deze frequentie is A_{u1} = [ ]
- Bij 445 en 455 kHz is de versterking per trap gedaald tot $\frac{100}{\sqrt{2}}$ x.
- Bij deze frequentie is de totale versterking A_{u2} = [ ]
- De bandbreedte per trap is B = [ ] kHz
- De bandbreedte van de totale versterker is **groter/kleiner/gelijk**

4. Men gebruikt in de praktijk een chopper-versterker bij het versterken van zeer kleine gelijkspanningen, omdat een andere gelijkspanningsversterker:

- o onvoldoende versterkt
- o een grotere bandbreedte heeft
- o verloopt te gevolge van gelijkspanningsdrift
- o ook wisselspanning versterkt.

C 8

VERSTERKERSCHAKELINGEN V
DE OPERATIONELE VERSTERKER

SAMENVATTING VAN DE VORIGE LES.

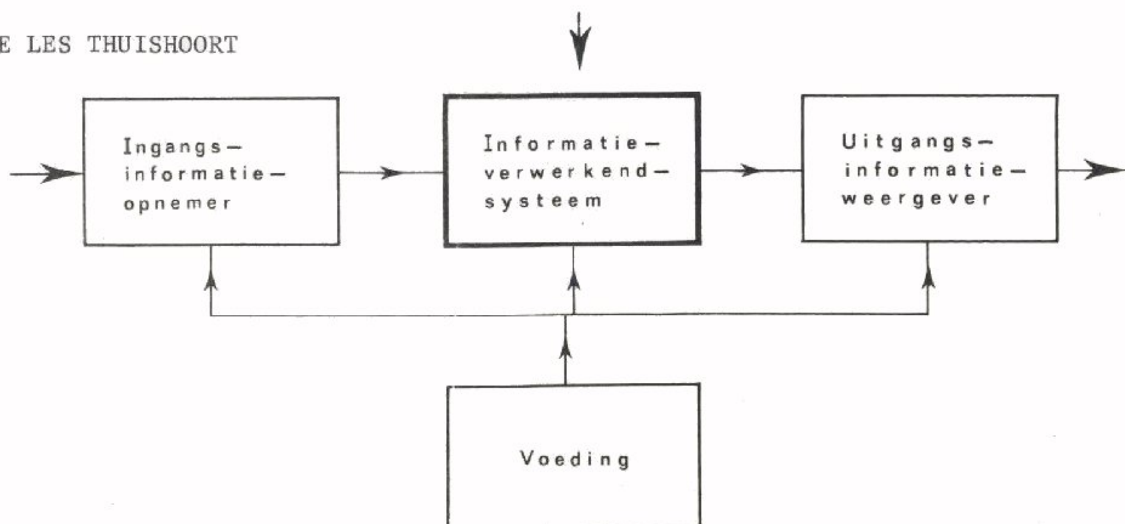
In de vorige les hebben we de volgende soorten versterkers behandeld.

- Versterkers die uitsluitend wisselspanning versterken.
- Versterkers die gelijk- en wisselspanning versterken.
- Versterkers die alleen gelijkspanning versterken.
- Versterkers met een relatief groot frequentiebereik ($f_{max} : f_{min}$ zeer groot).
- Versterkers met een relatief klein frequentiebereik ($f_{max} : f_{min}$ iets groter dan 1).

WAT GAAN WE IN DEZE LES DOEN ?

In deze les gaan we nog een ander type versterker bespreken, de zogenaamde *operationele versterker* (in het engels: "operational amplifier"; afgekort: op-amp). Oorspronkelijk werden operationele versterkers gebruikt voor rekenkundige "operaties" (bewerkingen), zoals optellen, aftrekken, vermenigvuldigen, delen, kwadrateren, enz. Tegenwoordig zijn er tal van andere toepassingen waarbij men operationele versterkers gebruikt. Met een operationele versterker kan men bijvoorbeeld op een eenvoudige wijze elektrische signalen opwekken; men kan een op-amp gebruiken als elektronische schakelaar. Men vindt op-amp's in voedingsapparaten enz. Een operationele versterker kan dus vele functies verrichten. Het is dan ook te verwachten dat deze versterkers steeds meer worden toegepast. Dit bovendien omdat ze als IC klein en goedkoop zijn; het laatste als ze in grote aantallen worden gemaakt. In deze les zullen we de operationele versterker uitsluitend als "versterker" behandelen. In het vervolg van de analoge schakelingen zullen we de operationele versterker ook in andere functies leren kennen.

WAAR DEZE LES THUISHOORT



WAT IS EEN OPERATIONELE VERSTERKER ?

Een operationele versterker is in feite een *gelijkspanningsversterker* met de volgende eigenschappen:

- grote versterking (10 000 tot 100 000 000).
- grote bandbreedte (0 Hz tot 100 à 1000 kHz).
- hoge ingangsimpedantie (100 kΩ en hoger).
- lage uitgangsimpedantie (1 kΩ en lager).
- weinig drift (1 μV tot 50 μV, teruggerekend naar de ingang).
- *twee* ingangen die geen van beiden aan 0 liggen (dit is iets nieuws). Bij gebruik van de ene ingang is de uitgangsspanning in fase met de ingangsspanning, bij gebruik van de andere ingang is de uitgangsspanning in tegenfase met de ingangsspanning.

Nadere toelichting:

Operationele versterkers zijn typische *spannings*versterkers. Het uitgangsvermogen is gering. De maximale uitgangsspanning wordt begrensd door de grootte van de voedingsspanning.

Omdat de versterking enorm groot is, wordt een operationele versterker bijna altijd in tegengekoppelde toestand toegepast. Zoals we al geleerd hebben, wordt hierdoor de stabiliteit, de bandbreedte en de lineaire- en niet-lineaire vervorming gunstig beindvloed.

De twee ingangen van een operationele versterker worden aangeduid met een "+" en "-" teken. Het "-" teken geeft aan dat een spanning op deze ingang een uitgangsspanning veroorzaakt die 180^0 verschoven is t.o.v. het ingangssignaal. Deze ingang noemt men de inverterende ingang (inverteren = omkeren). Een spanning op de "+" ingang veroorzaakt een uitgangsspanning die in fase is met het ingangssignaal. De "+" ingang noemt men de niet-inverterende ingang van een operationele versterker.

Men kan één van beide ingangen gebruiken terwijl de andere ingang dan aan aarde wordt gelegd. Men kan de twee ingangen van een operationele versterker echter ook tegelijk gebruiken. In deze les komen we hierop nog uitgebreid terug.

Hieronder in fig. a is het symbool van een operationele versterker afgebeeld. Fig. b geeft aan welke punten de ingangsspanningen worden toegevoerd en tussen welke punten de uitgangsspanning wordt afgenomen.

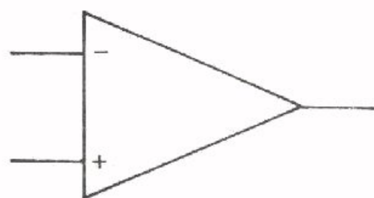


Fig. a

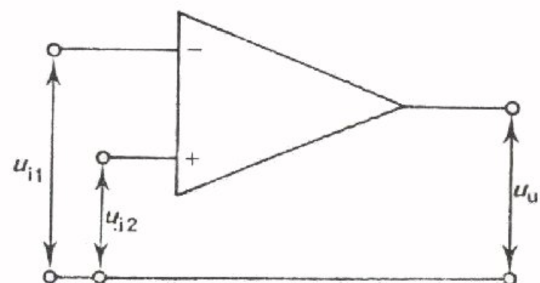
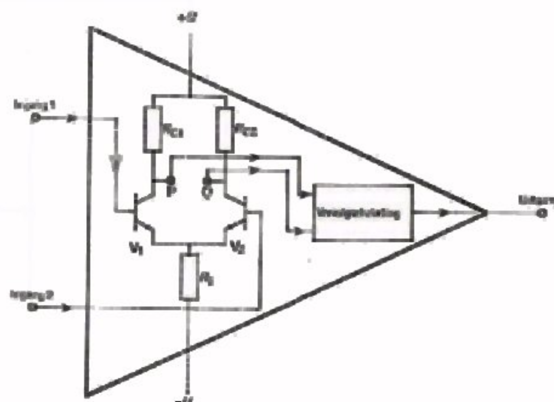


Fig. b

DE INGANGSTRAP VAN EEN OPERATIONELE VERSTERKER

Het meest opvallende verschil tussen een operationele versterker en een gewone gelijkspanningsversterker is dat de operationele versterker *twee* ingangen heeft. De operationele versterker heeft dus een ingangstrap die we nog niet eerder zijn tegengekomen. Daarom gaan we dit type ingangsschakeling eens nader bekijken. (zie figuur).

De schakeling bestaat uit twee gelijke versterkers (V_1-R_{C1} en V_2-R_{C2}) met een gemeenschappelijke emitterweerstand R_E. De basis van de transistor V_1 is met de ene ingang van de operationele versterker verbonden; de basis van V_2 met de andere ingang. Tussen de punten P en Q bevindt zich de uitgang van de ingangsschakeling. De spanning tussen deze punten wordt in de vervolgschakeling van de operationele versterker verder verwerkt.



Aan deze schakeling vallen de volgende punten op:

- de symmetrische opbouw.
  het rechter- en het linkerdeel van de schakeling zijn volkomen gelijk aan elkaar.
- de twee voedingsspanningen.
  de bovenkant van de collectorweerstand is verbonden met de positieve gelijkspanning $+U$; de onderkant van R_E met een even grote negatieve gelijkspanning $-U$. Bij de navolgende metingen gebruiken we hiervoor +15V en -15V.

Deze schakeling wordt in publicaties wel aangeduid met de engelse naam "LONG TAILED PAIR" (uitgesproken: long teelt per). In vrije vertaling betekent dit: (transistor)-paar met een lange staart. De "staart" duidt op de gemeenschappelijke emitterweerstand. Op blad 12 van deze les wordt deze schakeling verder behandeld.

OPDRACHT: HET INSTELLEN VAN HET NULPUNT VAN EEN OPERATIONELE VERSTERKER

Op blad 2 is vermeld dat een operationele versterker een gelijkspanningsversterker is. In de vorige les is behandeld waarom een gelijkspanningsversterker is uitgerust met een nulpuntsregelaar. Deze regelaar dient men zo in te stellen dat bij kortgesloten ingang(en) de uitgangsspanning nul volt is. Dit gaan we doen bij onze operationele versterker. Deze is samen met de nulpuntsregelaar (potentiometer) op blok 3 gemonteerd.

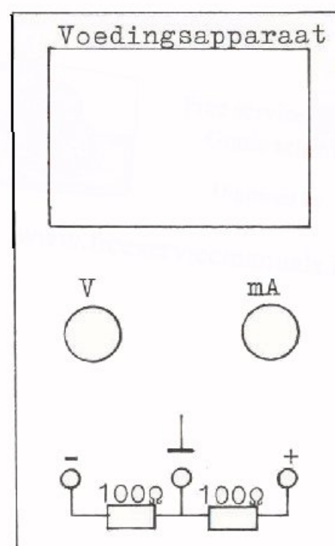
- Bouw de schakeling volgens blad 6 op uw paneel.

- Met behulp van de weerstanden R_1 en R_2 is de versterker tegengekoppeld. Uitgaande van de waarden van R_1 en R_2 verwachten we een versterking tussen ingang 1 en de uitgang van ongeveer:

  A_{u1} = [ ]

- De weerstanden R_3 en R_4 zorgen ervoor dat ingang 1 symmetrisch is met ingang 2. Dit is van belang bij een van de volgende metingen. De weerstanden R_5 en R_6 staan los van de versterker. De bedoeling van deze weerstanden komt bij de volgende opdracht pas aan de orde.

- Sluit 2 weerstanden van 100Ω aan tussen de klemmen van een DC-voedingsapparaat. Regel de spanning op 30 V en zet het stroombereik op maximum.



- De "+"-klem is nu [ ] V

  positief/negatief t.o.v. aarde.

  De "-"-klem is nu [ ] V

  positief/negatief t.o.v. aarde.

- De "+" klem van de voeding wordt verbonden met de + van blok 3.

  De "-" klem van de voeding wordt verbonden met de - van blok 3.

  De aardklem van de voeding komt aan de aardleiding op Uw paneel.

- Sluit ingang 1 en ingang 2 kort tegen aarde. Draai de nulpuntsregelaar tot de gelijkspanning op de uitgang 0 V is. Controleer dit met een gelijkspanningsmeter.

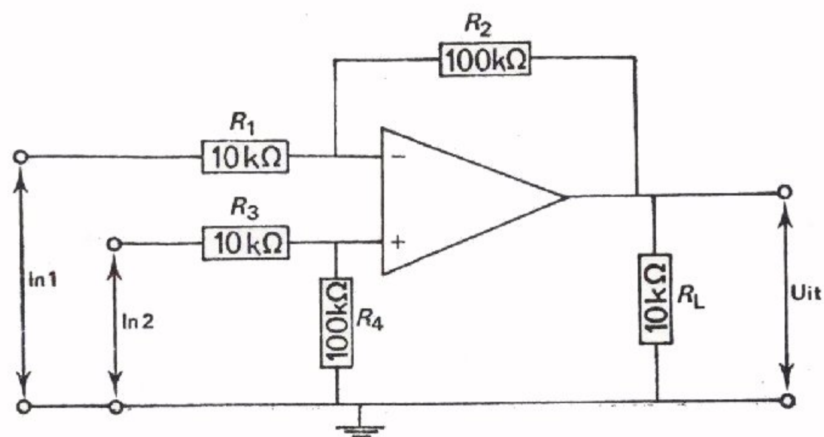
- Verwijder de kortsluitingen van ingang 1 en ingang 2.

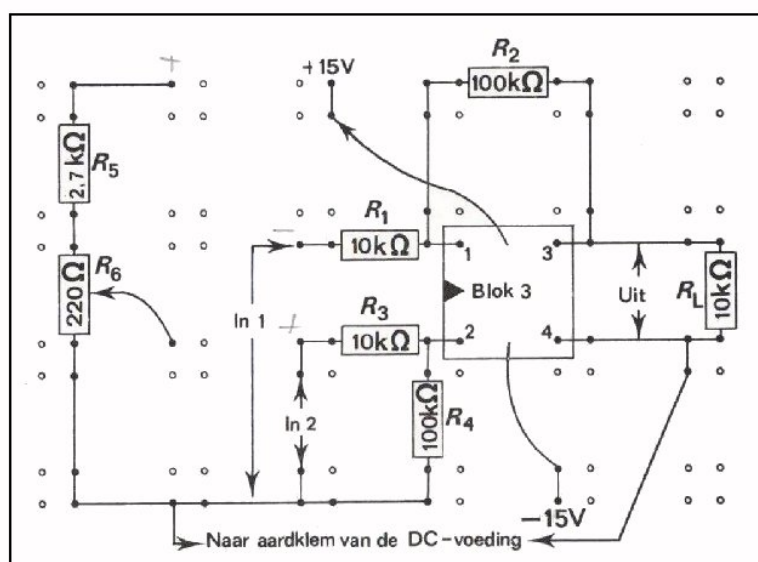
De operationele versterker is nu klaar voor gebruik. We gaan de volgende opdrachten uitvoeren:

het gebruik van de "-" ingang.
het gebruik van de "+" ingang.
het gebruik van beide ingangen tegelijk.

De gelijkspanningsmetingen voeren we uit met een universeelmeter.
Voor de wisselspanningsmetingen gebruiken we een oscilloscoop.

MEETOPSTELLING

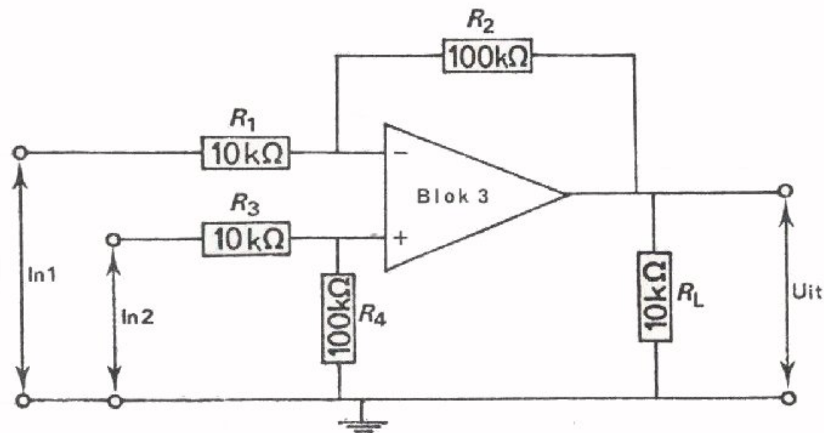




Ingang 1 is de "-" ingang van de operationele versterker.

Ingang 2 is de "+" ingang van de operationele versterker.

OPDRACHT: HET GEBRUIK VAN DE "-" INGANG VAN EEN OPERATIONELE VERSTERKER



A. HET METEN VAN DE GELIJKSPANNINGSVERSTERKING

- Schakel de operationele versterker zoals hierboven is weergegeven. De "+" ingang ligt via R_3 aan aarde en wordt bij deze meting niet gebruikt.
- Leg een positieve gelijkspanning van 0,5 V aan ingang 1. De spanning verkrijgt U als volgt: Verbind de bovenkant van R_5 met de "+" voedingsspanning (zie blad 5). Regel R_6 tot er 0,5 V beschikbaar komt tussen het loopcontact en aarde. Verbind nu het loopcontact van R_6 met R_1.
- Meet de versterking van de op-amp. Deze is [ ]

  De versterking is **gelijk/niet gelijk** aan $\frac{R_2}{R_1}$.
- De toegevoerde ingangsspanning is positief ten opzichte van aarde. Controleer de polariteit van de uitgangsspanning.

  Deze is **positief/negatief** t.o.v. aarde.

  De polariteit van de uitgangsspanning is dus **gelijk/tegengesteld** gericht aan die van de ingangsspanning.
- Leg de bovenkant van R_5 aan de "-" van de voedingsspanning. De ingangsspanning is nu negatief ten opzichte van aarde. Controleer of hij ook 0,5 V bedraagt.
- Meet opnieuw de versterking. Deze is [ ]
- Meet de polariteit van de uitgangsspanning.

  Deze is **positief/negatief** t.o.v. aarde.

  De polariteit van de uitgangsspanning is dus **gelijk/tegengesteld** gericht aan die van de ingangsspanning.

CONCLUSIES

- De gelijkspanningsversterking is gelijk aan de verhouding $\frac{R_2}{R_1}$.
- De polariteit van de uitgangsspanning is tegengesteld gericht aan die van de ingangsspanning.

B. HET METEN VAN DE WISSELSPANNINGSVERSTERKING

- Leg een sinusvormige spanning aan ingang 1 met een amplitude van 0,5 V bij f = 1 kHz.
- Meet de versterking. Deze is [ ]
- Meet het faseverschil tussen in- en uitgangsspanning met behulp van de oscilloscoop. Ga hierbij als volgt te werk. Trigger de oscilloscoop EXTERN met behulp van de generatorspanning. Maak daarna achtereenvolgens de ingangsspanning en de uitgangsspanning zichtbaar. U constateert nu dat het faseverschil tussen ingangs- en uitgangsspanning gelijk is aan [ ]

CONCLUSIES

- Ook de wisselspanningsversterking is gelijk aan $\frac{R_2}{R_1}$.
- De uitgangsspanning is in tegenfase met de ingangsspanning.

OEFENING

We gebruiken de schakeling van blad 7. Aan ingang 1 hiervan wordt een spanning toegevoerd waarvan het verloop in fig. a is afgebeeld. Teken in fig. b het verloop van de uitgangsspanning (zet spanningswaarden langs de verticale as).

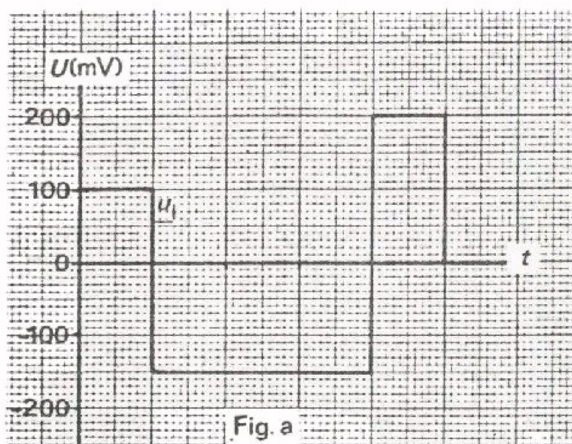


Fig. a

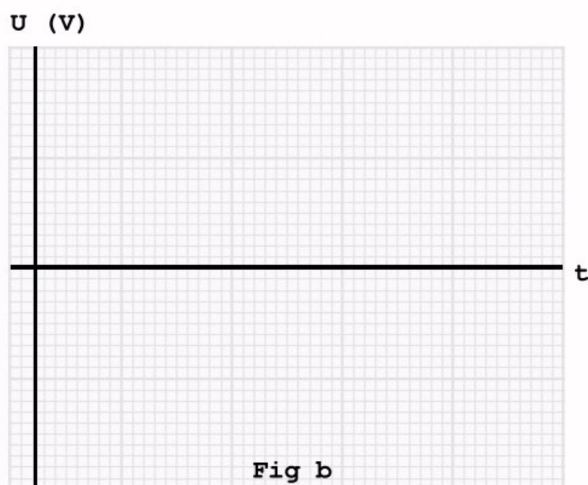
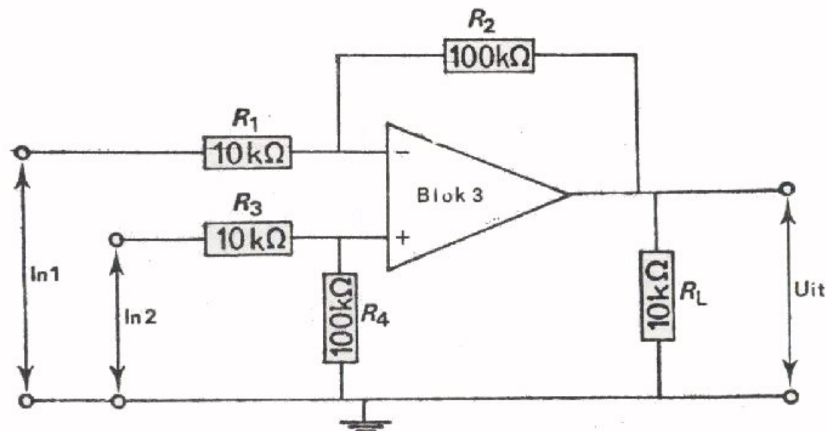


Fig b

OPDRACHT: HET GEBRUIK VAN DE "+" INGANG



- Schakel de operationele versterker zoals in het schema is weergegeven. De "-" ingang ligt via R_1 aan aarde en wordt bij deze meting niet gebruikt.

A. GELIJKSPANNINGSVERSTERKING

- Leg een positieve gelijkspanning van 1 V aan ingang 2 (te regelen met R_6).
- Meet de versterking. Deze is ________

  De versterking blijkt **gelijk/niet gelijk** te zijn aan $\frac{R_2}{R_1}$.

- Controleer de polariteit van de uitgangsspanning.

  Deze is **positief/negatief** t.o.v. aarde.

  De polariteit van de uitgangsspanning is dus **gelijk/tegengesteld** gericht aan die van de ingangsspanning.

- Leg nu een negatieve spanning van 1 V aan ingang 2.
- Meet de versterking. Deze is ________
- Bepaal de polariteit van de uitgangsspanning.

  Deze is **positief/negatief** t.o.v. aarde.

  De polariteit van de uitgangsspanning is dus **gelijk/tegengesteld** gericht aan die van de ingangsspanning.

CONCLUSIES

- De gelijkspanningsversterking is evenals bij opdracht 2 gelijk aan de verhouding $\frac{R_2}{R_1}$.
- De polariteit van de uitgangsspanning is gelijk gericht aan die van de ingangsspanning.

B. WISSELSPANNINGSVERSTERKING

- Voer een sinusvormige spanning toe aan ingang 2 met een amplitude van 1 V bij f = 1 kHz.
- Meet de versterking. Deze is [ ]
- Meet het faseverschil tussen in- en uitgangsspanning met behulp van een oscilloscoop. Dit is [ ]

CONCLUSIES

- Ook de wisselspanningsversterking is gelijk aan $\frac{R_2}{R_1}$.
- De uitgangsspanning is in fase met de ingangsspanning.

OEFENINGEN

1. We gebruiken de schakeling van blad 9. Aan de ingang hiervan wordt een spanning toegevoerd waarvan het verloop in fig. a is afgebeeld. Teken in fig. b het verloop van de uitgangsspanning (zet spanningswaarden langs de verticale as).

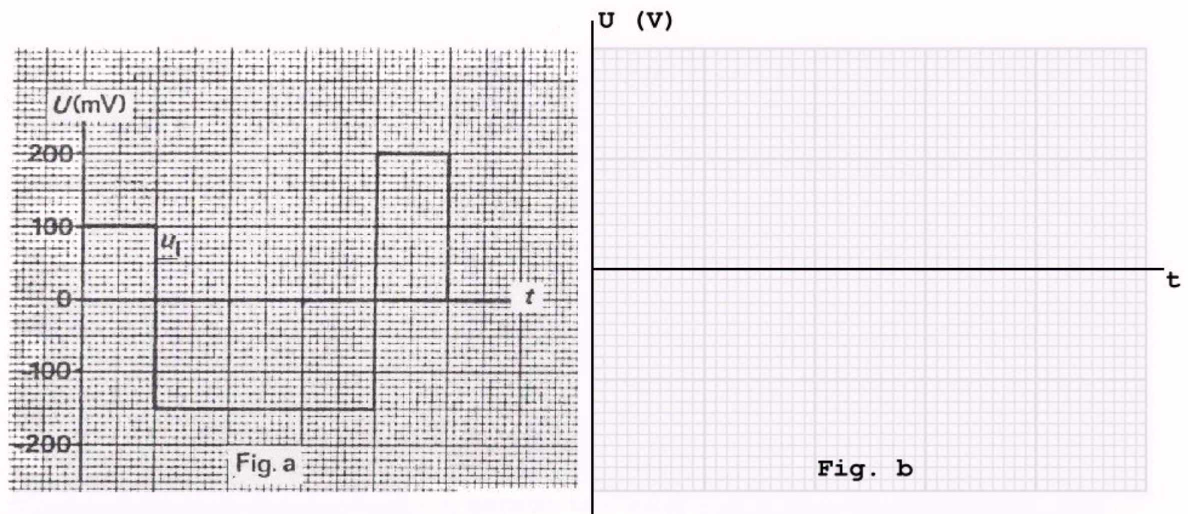
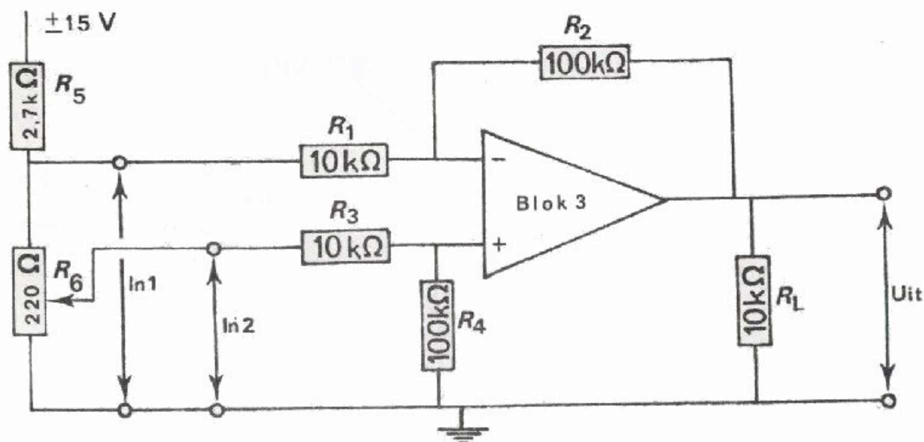


Fig. a Fig. b

2. In de schakeling volgens blad 9 vormen R_3 en R_4 een spanningsdeler. Deze verzwakt het ingangssignaal enigszins voordat het op de "+" ingang van de operationele versterker terecht komt. Als we R_3 groter maken wordt de versterking tussen ingang 2 en de uitgang **groter/kleiner**

OPDRACHT: HET GEBRUIK VAN DE "+" EN "-" INGANG TEGELIJK



- Schakel de operationele versterker zoals in bovenstaande schema is weergegeven.

- Verbind de bovenkant van R_5 met de "+" voedingsspanning. Regel R_6 tot het spannings*verschil* tussen ingang 1 en ingang 2 0,1 V bedraagt. Meet dit spanningsverschil met een universeelmeter.

  De spanning op ingang 2 is nu 0,1 V **positief/negatief** t.o.v. ingang 1.

- Meet de uitgangsspanning. Deze is ______ V

  De uitgangsspanning is ______ maal zo groot als het spannings-*verschil* tussen ingang 1 en ingang 2. Dit is gelijk aan de verhouding $\frac{R_2}{R_1}$.

- Meet de polariteit van de uitgangsspanning.

  Deze is **positief/negatief** t.o.v. aarde.

- Leg nu de bovenkant van R_5 aan de "-" voedingsspanning. Regel R_6 tot het spanningsverschil tussen ingang 1 en ingang 2 0,2 V is. Meet deze spanning met een universeelmeter.

  De spanning op ingang 2 is nu 0,2 V **positief/negatief** t.o.v. ingang 1.

- Meet de uitgangsspanning. Deze is ______ V

  De uitgangsspanning is ______ maal zo groot als het spanningsverschil tussen ingang 1 en ingang 2. Dit is weer gelijk aan R_2/R_1.

- Bepaal de polariteit van de uitgangsspanning.

  Deze is **positief/negatief** t.o.v. aarde.

CONCLUSIES

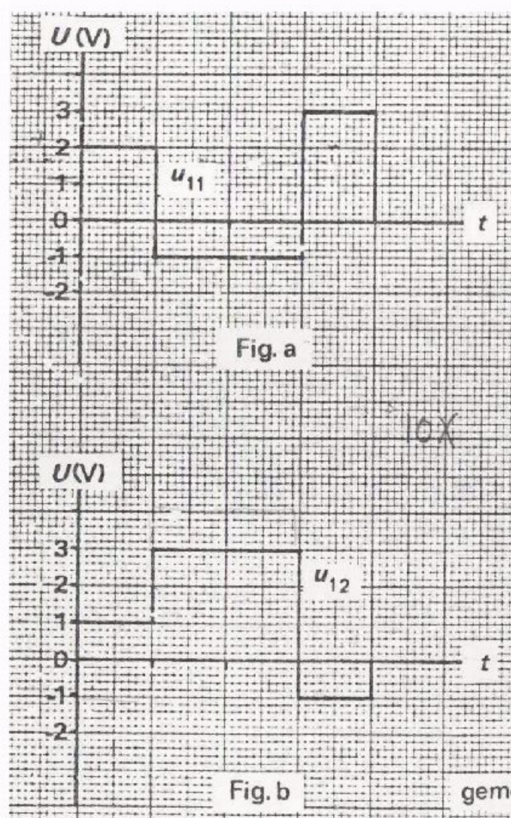
- Het spannings*verschil* tussen ingang 1 en ingang 2 wordt versterkt. De grootte van de versterking is afhankelijk van de tegenkoppeling. De operationele versterker wordt hier als *verschilversterker* (in het engels: differential amplifier) gebruikt.
- De polariteit van de uitgangsspanning ten opzichte van aarde is gelijk aan de polariteit van de spanning op ingang 2 t.o.v. ingang 1.

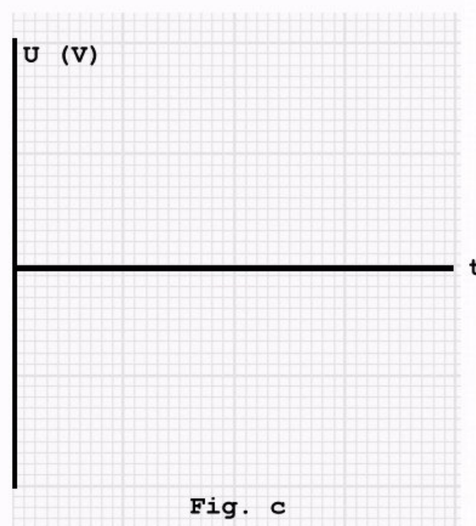
OPMERKING

Men kan de verschilversterker ook gebruiken voor wisselspanningen of voor gelijk- en wisselspanningen tegelijk.

OEFENING

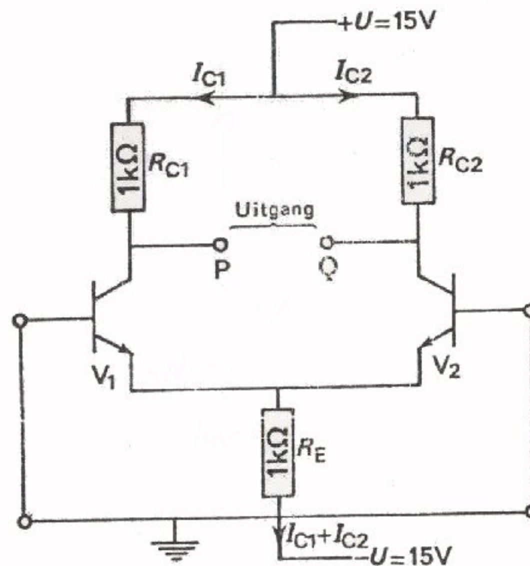
We gebruiken de schakeling van blad 11.
Aan ingang 1 wordt een spanning toegevoerd die verloopt volgens fig. a.
Op ingang 2 staat een spanning volgens fig. b. Teken in fig. c het verloop van de uitgangsspanning (zet spanningswaarden langs de verticale as).





DE WERKING VAN DE "LONG TAILED PAIR"

Op pag. 4 hebben we gezien dat de ingangstrap van een operationele versterker bestaat uit een "*long tailed pair*"-schakeling. Op dit blad zullen we nagaan hoe de "long tailed pair" reageert als beide ingangen aan aarde worden gelegd (zie opdracht 1 op blad 5).



Er vloeit een gelijkstroom $I_{C1} + I_{C2}$ van $+U$ naar $-U$. Veronderstel dat $I = I_{C1} + I_{C2} = 14$ mA. Dan valt er over R_E een spanning van $I.R_E = 14$ V. De bovenkant van R_E is dan $-U + 14$ V = −1 V t.o.v. aarde. De U_{BE} van beide transistors bedraagt dus 1 V.

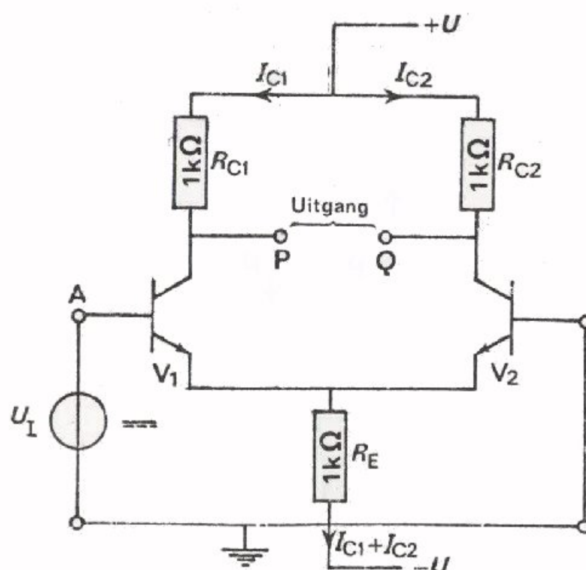
Als we nu aannemen dat de transistors en de collectorweerstanden precies gelijk zijn, dan is $I_{C1} = I_{C2} = (I_C) = 7$ mA. Dan wordt de spanning op de collectors van V_1 en V_2: $+U - I_C R_C = 15$ V − 7 V = 8 V t.o.v. aarde. Het spannings*verschil* tussen de punten P en Q is dan 8 V − 8 V = 0 V. De uitgangsspanning van de schakeling is dus nul als de ingangsspanningen elk 0 zijn.

Zolang beide helften van de schakeling gelijk zijn, blijven de spanningen op P en Q even groot. Ook bij voedingsspanningsvariaties en temperatuurvariaties. Als de voedingsspanning of de temperatuur van de onderdelen verandert, zullen de collectorstromen en misschien ook de collectorweerstanden groter of kleiner worden. Zolang echter $I_{C1} = I_{C2}$ en $R_{C1} = R_{C2}$, zal ook de spanningsval over R_{C1} gelijk blijven aan die over R_{C2}.
De spanning tussen P en Q blijft dan 0 V. De "drift" van deze schakeling is dus laag.

In de praktijk is de schakeling nooit helemaal symmetrisch. De belangrijkste oorzaken hiervan zijn de toleranties van de onderdelen en de temperatuurverschillen tussen het linker- en rechterdeel van de schakeling. Hierdoor zal er tussen de uitgangsklemmen altijd enige spanning overblijven als de ingangen zijn kortgesloten. Dit hebben we reeds opgemerkt bij opdracht van pag. 5. Tijdens deze opdracht hebben we de uitgangsspanning op nul gebracht met behulp van een potentiometer. Deze potentiometer kan bijv. een van de collectorweerstanden zijn. Door regeling van deze collectorweerstand kan men de spanningsval hierover gelijk maken aan die over de andere collectorweerstand. De spanning tussen P en Q wordt dan 0 V.

DE "LONG TAILED PAIR" ALS NIET-SYMMETRISCHE VERSTERKER

We gaan nu bekijken hoe de "long tailed pair" zich gedraagt als de ene ingang is kortgesloten, terwijl aan de andere ingang de te verwerken spanning wordt toegevoerd (vergelijk de opdrachten van pag. 8 en 10).



We herhalen eerst nog even hoe de instelling van de schakeling was toen beide ingangen van de schakeling waren kortgesloten (zie vorig blad). Toen was $I_{C1} = I_{C2}$ en $U_{PQ} = 0$ V.

Nu gaan we aan de linker ingang van de schakeling een gelijkspanning U_i toevoeren. We zorgen ervoor dat de basis van V_1 positiever wordt. Er gebeurt nu het volgende:

- I_{C1} (en dus ook I_E) wordt groter.
- U_{RE} neemt toe waardoor de U_{BE} van V_2 afneemt (ga dit voor Uzelf na)
- I_{C2} wordt dus kleiner.
- Punt Q gaat omhoog in spanning.
- Punt P gaat omlaag in spanning.
- Er ontstaat een gelijkspanning tussen de punten P en Q, waarbij punt Q *positief* wordt ten opzichte van P.

Als we de polariteit van de ingangsspanning omdraaien zal V_1 minder stroom en V_2 meer stroom gaan voeren. De uitgangsspanning draait om: punt Q wordt nu *negatief* ten opzichte van P.

De grootte van de uitgangsspanning is: $U_{PQ} = -S.R_C\ U_I$

Deze formule geldt zowel voor het versterken van gelijkspanning als voor wisselspanning. Het afleiden van de formule leidt te ver.

OEFENING

Aan bovenstaande schakeling wordt een wisselspanning u_i toegevoerd.
De steilheid van V_1 en V_2 is 80 mA/V. $R_{C1} = R_{C2} = R_C = 1$ kΩ.

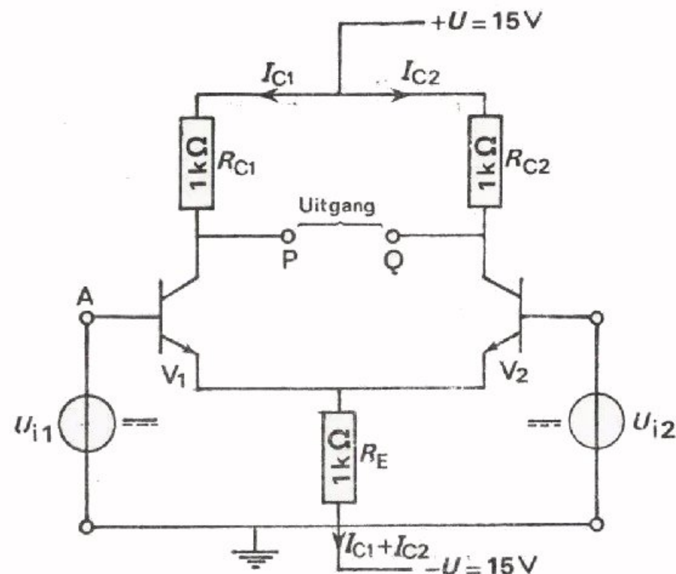
- u_p (t.o.v. aarde) is in [ ] met u_q (t.o.v. aarde).
- De versterking $\frac{U_{(pq)t}}{U_{it}}$ = **fase/tegenfase**

DE "LONG TAILED PAIR ALS VERSCHILVERSTERKER"

We gaan vervolgens na hoe de "long tailed pair" werkt als we aan beide ingangen spanningen toevoeren (bij opdracht 4 hebben we dit praktisch uitgevoerd).

We gaan even terug naar de toestand dat beide ingangen doorverbonden zijn met aarde. De instelling van de schakeling is dan:

$$I_{C1} = I_{C2}\ ;\ \ U_{PQ} = 0.$$



We gaan nu aan beide ingangen *even grote* gelijkspanningen aanbrengen. ($U_{I1} = U_{I2}$). We maken de ingangsklemmen beide positief t.o.v. aarde, zodat de basissen van V_1 en V_2 positiever worden. Als we aannemen dat de schakeling volkomen symmetrisch is, dan zal de toename van U_{BE1} gelijk zijn aan die van U_{BE2}. Het gevolg is hiervan dat:

- I_{C1} en I_{C2} evenveel toenemen;
- De spanningen op P en Q evenveel dalen;
- De uitgangsspanning U_{PQ} 0 V blijft.

Ook als we de polariteit van de ingangsspanningen beide omkeren, blijft de uitgangsspanning 0 V (ga dit voor Uzelf na). We kunnen dus vaststellen dat er voor *gelijk gerichte even grote* ingangsspanningen *geen versterking* optreedt als de schakeling symmetrisch is.

Als U_{I1} groter is dan U_{I2} zal I_{C1} meer toenemen dan I_{C2}. Punt P daalt meer in spanning dan punt Q. Er ontstaat nu wél een uitgangsspanning waarbij punt Q positief is t.o.v. punt P. In het algemeen kunnen we dus stellen dat de schakeling *wel* versterkt als er *verschil* is tussen U_{I1} en U_{I2}. De "long tailed pair" werkt dus als verschilversterker als er aan beide ingangen wordt gestuurd.

Men kan afleiden dat de uitgangsspanning van de verschilversterker gelijk is aan:

$$U_{PQ} = S.R_C\ (U_{I2} - U_{I1}) \text{ mits } S.R_E \text{ groot is}$$

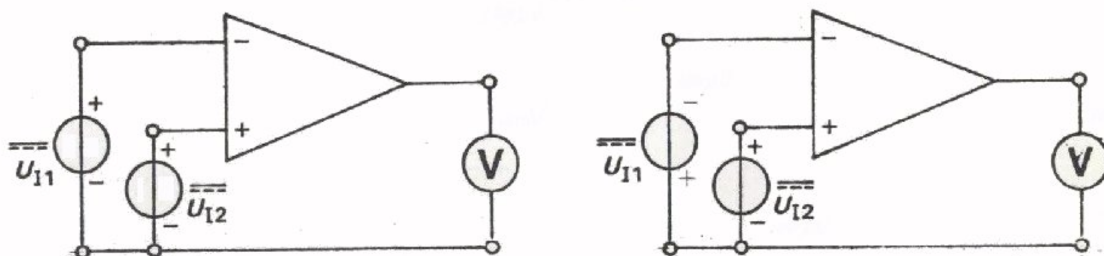
Deze formule geldt ook als U_{I1} en U_{I2} wisselspanningen zijn.

DE "COMMON MODE REJECTION"

De *common mode rejection* (uitspraak: kommen moot rie-dzeksjen) betekent eigenlijk: onderdrukking van gelijk gerichte ingangssignalen. Afkorting: CMR. In het voorgaande hebben we geleerd dat even grote gelijk gerichte ingangssignalen geen uitgangsspanning geven, indien de verschilversterker volkomen symmetrisch is. In de praktijk is volkomen symmetrie echter niet mogelijk. Door toleranties van de onderdelen en temperatuurverschillen in de versterker zullen de twee delen van een verschilversterker nooit precies gelijk aan elkaar zijn. Het gevolg is dat even grote gelijk gerichte ingangsspanningen bij een praktische verschilversterker toch enige uitgangsspanning veroorzaken. Ofschoon het verschil der ingangsspanningen nul is, is de uitgangsspanning dus niet gelijk aan nul.

De "common mode rejection" geeft aan in hoeverre *gelijk gerichte* ingangsspanningen in de verschilversterker worden onderdrukt ten opzichte van *tegengesteld gerichte* ingangsspanningen.

Wat men precies met de CMR bedoelt zullen we uitleggen aan de hand van een meetbeschrijving.



Men legt twee gelijk gerichte spanningen van bijv. 1 V aan de ingangen van de verschilversterker volgens fig. a. Men meet de uitgangsspanning; deze is bijv. 10 mV. Daarna draait men één van de ingangsspanningen om (zie fig. b) zodat U_{I1} tegengesteld is aan U_{I2}. Men maakt nu beide spanningen zoveel kleiner dat de uitgangsspanning weer 10 mV is. Stel dat U_{I1} en U_{I2} nu elk 100 μV zijn.

Gelijk gerichte ingangsspanningen van 1 V veroorzaken hier dus evenveel uitgangsspanning als *tegengesteld gerichte* ingangsspanningen van 100 μV. Of anders gezegd: gelijk gerichte ingangsspanningen worden

$$10.000 \text{ x } \left(= \frac{1\text{ V}}{100\ \mu\text{V}}\right)$$ meer onderdrukt dan tegengesteld gerichte ingangssignalen.

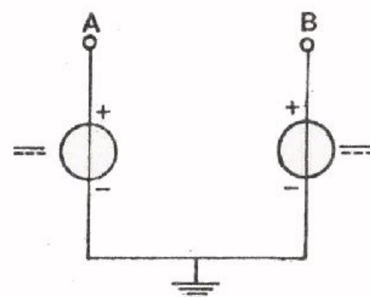
De CMR van deze versterker is dus gelijk aan 10.000.

De CMR van praktische operationele versterkers ligt tussen 10^3 en 10^8.

De CMR van een ideale operationele versterker is 

WANNEER GEBRUIKT MEN VERSCHILVERSTERKERS ?

We noemen enkele voorbeelden.



1. We hebben twee spanningen t.o.v. aarde.

   $U_A = 10$ V, $U_B = 10{,}001$ V.

   We willen het spannings*verschil*

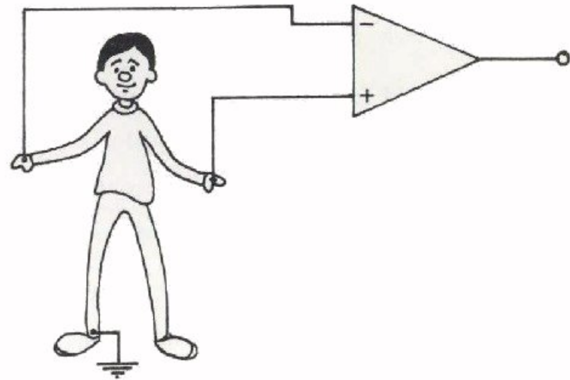
   $U_{AB} = 1$ mV meten.

   Dit kunnen we op twee manieren doen:

   a. We meten eerst U_A, daarna U_B, en trekken de meetresultaten van elkaar af. Deze methode is zeer onnauwkeurig omdat er geen voltmeters zijn waarop we in het 10 V- bereik een spanningsverschil van 1 mV kunnen aflezen.

   b. We meten U_{AB} direct. De moeilijkheid is nu dat we vrij van aarde moeten meten. U zult waarschijnlijk al eerder ervaren hebben dat er dan stoorsignalen (brom) optreden die een veel grotere meteruitslag veroorzaken dan het te meten signaal van 1 mV. De storing kan men grotendeels onderdrukken door gebruik te maken van een verschilversterker. Men verbindt punt A met de ene ingang en punt B met de andere ingang van de verschilversterker. De stoorsignalen komen in fase (m.a.w. in gelijke richting) op de ingangen en hebben dus nagenoeg geen uitgangsspanning tot gevolg. De verschilspanning van 1 mV wordt wél versterkt.

2. Een sprekend voorbeeld van toepassing van de verschilversterker zijn de metingen die worden verricht om zogenaamde spierspanningen van het menselijk lichaam te bepalen. Door de werking van de hartspier ontstaan tussen delen van het menselijk lichaam (zoals de polsen) en aarde zéér kleine elektrische spanningen.



De informatie die men wenst is bijvoorbeeld het *verschil* tussen de zeer kleine polsspanningen. Dit verschil ligt in de grootte orde van μV. Het menselijk lichaam pikt uit de omgeving echter véél grotere stoorspanningen op die in de orde-grootte van mV of zelfs V liggen. Genoemde stoorspanningen zijn in fase op beide polsen aanwezig en véél groter dan te meten verschilspanning. We hebben hier dus een verschilversterking nodig die het stoorsignaal minstens een factor 10^6 onderdrukt t.o.v. het te meten verschilsignaal (CMR > 10^6).

Over het algemeen kan men stellen dat verschilversterkers gebruikt worden op plaatsen waar zeer kleine spannings*verschillen* moeten worden gemeten tussen punten die vrij van aarde liggen.

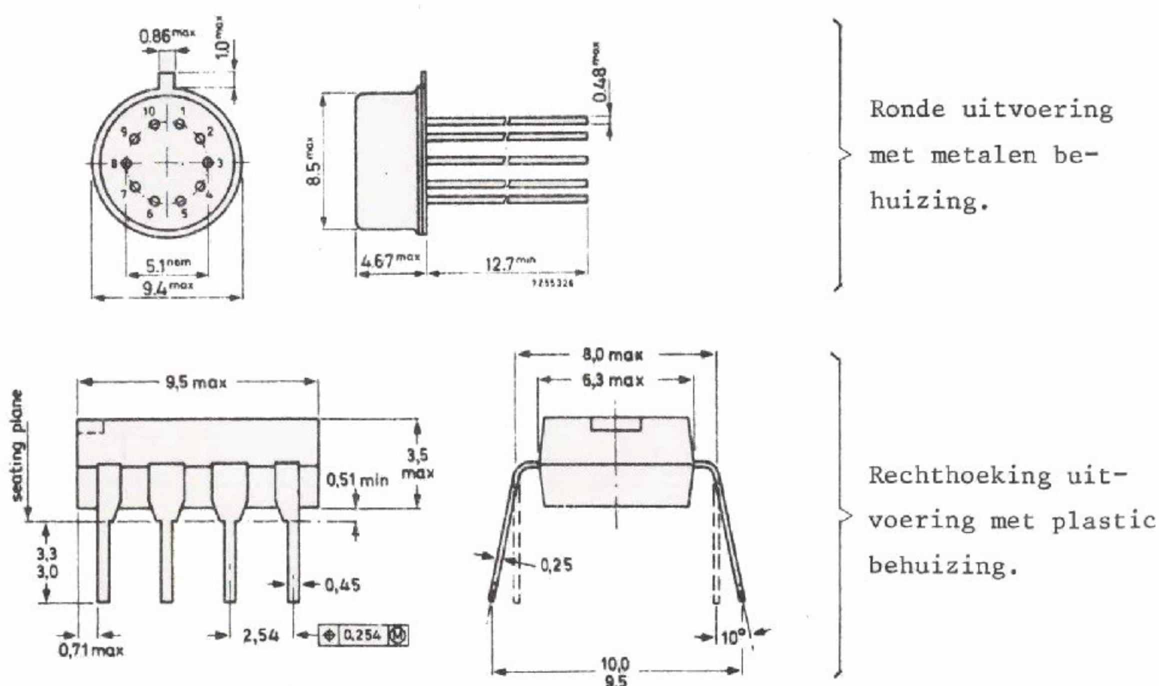
UITVOERINGSVORMEN VAN OPERATIONELE VERSTERKERS

De vroeger gemaakte operationele versterkers met buizen waren nogal lijvige apparaten. De gebruikte elektronenbuizen ontwikkelden veel warmte. Hierdoor was de gelijkspanningsdrift ten gevolge van temperatuurvariaties aanzienlijk, zowel de hoogspanningen als de gloeispanningen moesten worden gestabiliseerd om te voorkomen dan de "drift" bij netspanningsschommelingen ontoelaatbaar werd. Vanzelfsprekend waren deze buizenversterkers ook duur.

Bij de opkomst van de transistor werden de afmetingen van operationele versterkers aanzienlijk kleiner. De warmteontwikkeling was veel kleiner waardoor de gelijkspanningsdrift gunstiger werd. Operationele versterkers uitgevoerd met transistors, zijn bovendien goedkoper dan de oude buizenversterkers.

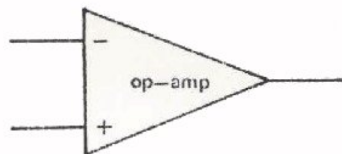
Aanvankelijk werden operationele versterkers uit aparte componenten samengesteld. De laatste jaren worden operationele versterkers steeds vaker, in een IC uitvoering geleverd. De afmetingen zijn daarbij minimaal en daardoor zijn ook de temperatuurverschillen tussen de verschillende delen van de versterkers zeer gering. De symmetrie van de verschilversterker blijft hierdoor beter gehandhaafd (dus een hoge CMR en weinig "drift" bij temperatuurschommelingen). IC uitvoeringen zijn bovendien aanmerkelijk goedkoper dan die waarbij de schakeling bestaat uit aparte componenten.
Het nadeel van IC's is evenwel dat exemplaren van eenzelfde type nogal spreiding in eigenschappen vertonen. Dit kan men grotendeels opvangen door een sterke tegenkoppeling toe te passen.

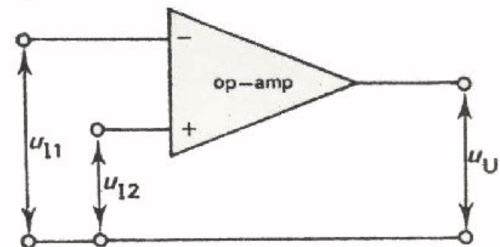
Vorm en afmetingen (in mm) van IC-uitvoeringen.



SAMENVATTING

- Een operationele versterker is een gelijkspanningsversterker met:
  - grote versterking
  - grote bandbreedte
  - hoge ingangsimpedantie
  - lage uitgangsimpedantie
  - weinig drift
  - twee ingangen.
- Afkorting operationele versterker: op-amp.





- Een operationele versterker kan men voor verschillende functies gebruiken. Als versterker kan hij geschakeld worden als:
  - (fase)-omkerende versterker (inverting amplifier)
  - niet-omkerende versterker (non-inverting amplifier)
  - verschil-versterker (differential amplifier)
- De ingang van een op-amp bevat een symmetrische schakeling met twee ingangen. Deze schakeling noemt men een "long tailed pair".
- Een "long tailed pair" kan men gebruiken als niet-symmetrische versterker (fig.a) en als symmetrische versterker (fig.b).

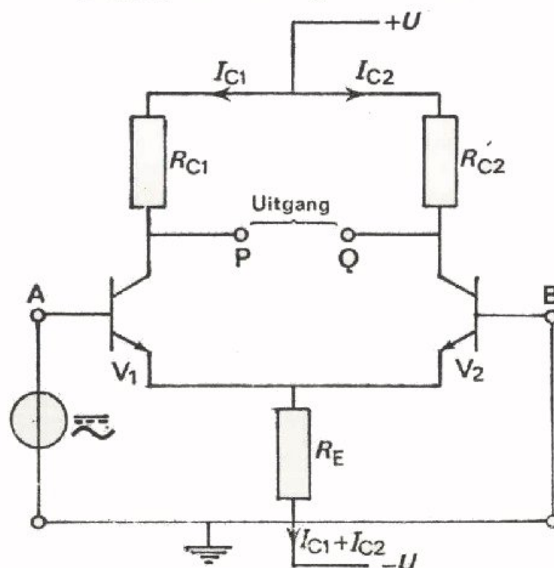


Fig. a

$$U_{PQ} = -S.R_C.U_{AB}$$

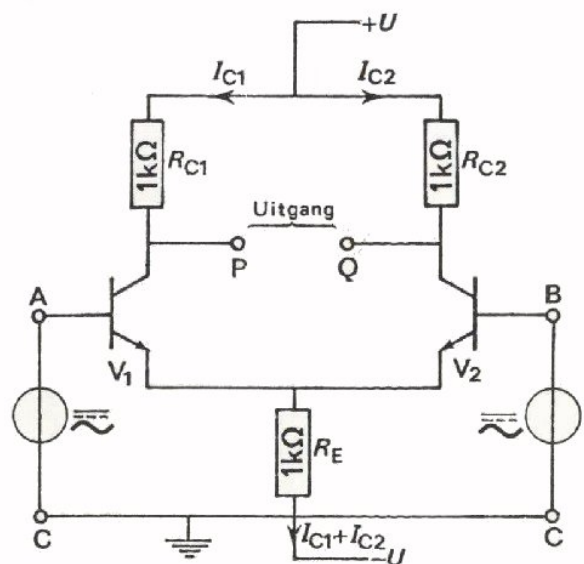


Fig. b

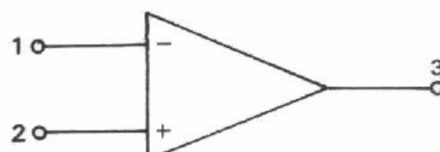
$$U_{PQ} = S.R_C(U_{BC} - U_{AC})$$

- De kwaliteit van een verschilversterker wordt weergegeven met de "common-mode-rejection". De CMR is de verhouding van gelijk gerichte en tegengesteld gerichte ingangssignalen die een even grote uitgangsspanning veroorzaken.
- Een verschilversterker gebruikt men, als kleine spanningsverschillen moeten worden gemeten tussen punten die vrij van aarde liggen. Eventuele stoorsignalen worden daarbij niet versterkt.

NAAM: KLAS:

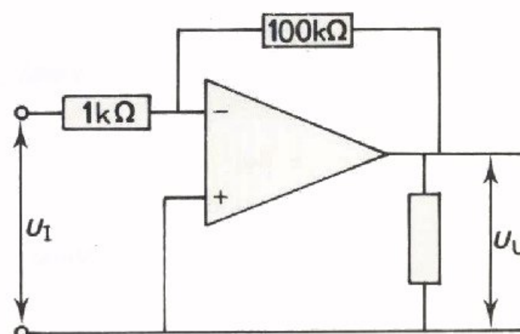
OEFENINGEN

1. Als men klem 1 positiever maakt t.o.v. aarde, wordt klem 3 **positiever/negatiever** t.o.v. aarde. Als men klem 2 negatiever maakt t.o.v. aarde, wordt klem 3 **positiever/negatiever** t.o.v. aarde.

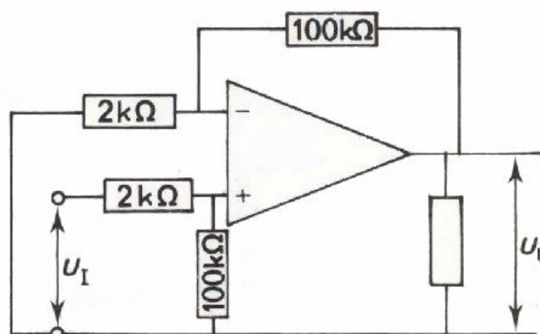




2. Bij nevenstaande schakeling is
   U_I = 10 mV
   U_U = V
   U_U is in **fase/tegenfase** met u_i.



3. Bij de afgebeelde schakeling is
   U_I = 20 mV.
   U_U = V
   U_U is in **fase/tegenfase** met u_i.

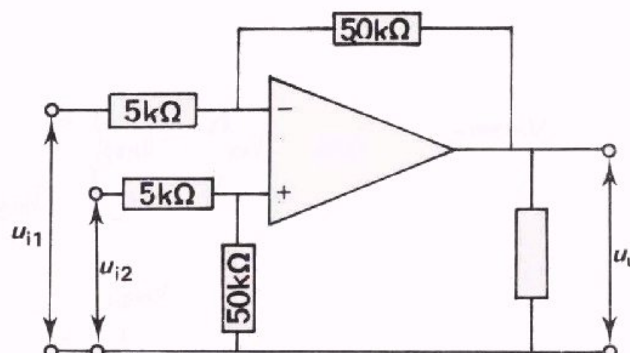


Het ingangssignaal (U_I) wordt in deze schakeling via een spanningsdeler aan de "+"-ingang van de op-amp gelegd.
Hoe groot is de uitgangsspanning U_U als men U_I direct aan de "+"-ingang toevoert?

U_U = V . Denk goed na voordat u het antwoord invult!

4. De op-amp volgens nevenstaand schema is geschakeld als:

- o omkeerversterker
- o verschilversterker
- o niet-omkeerversterker



- Als U_{i1} = 50 mV en U_{i2} = 40 mV, en deze wisselspanningen in fase zijn, dan is de uitgangsspanning [V]
- u_u is in **fase/tegenfase** met de ingangsspanningen.
- Hoe groot wordt de uitgangsspanning als men u_{i2} 180° in fase draait ?

  U_u wordt dan [V]
- Hoe groot wordt de uitgangsspanning als men óók u_{i1} 180° in fase draait ?

  U_u wordt dan [V]
- Hoe groot wordt U_u bij $u_{i1} = u_{i2}$ (ook fase gelijk)?

  U_u wordt dan [V]

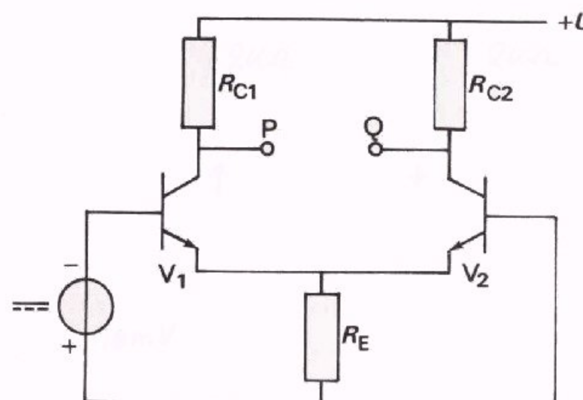
5. Gegeven: als de basis van V_1 en V_2 aan aarde liggen is $I_{C1} = I_{C2}$.

Verder is gegeven:

$R_{C1} = R_{C2}$ = 2 kΩ.

Steilheid V_1 en V_2 100 mA/V.

Aan de basis van V_1 wordt een negatieve gelijkspanning van 10 mV t.o.v. aarde gelegd.



- Hoe groot is de uitgangsspanning ? U_{PQ} = [V]
- Punt P is **positief/negatief** t.o.v. punt Q.

C 9

VERZWAKKERSCHAKELINGEN I

FREQUENTIE-ONAFHANKELIJKE EN FREQUENTIE-AFHANKELIJKE VERZWAKKERS

INLEIDING

In de vorige lessen is uitvoerig ingegaan op de functie *versterken*.
We hebben achtereenvolgens behandeld:

- C4: De uitwendige eigenschappen van versterkers.
- C5: Het inwendige van een versterker.
- C6: Tegenkoppelen.
- C7: Diverse soorten versterkers.
- C8: De operationele versterker.

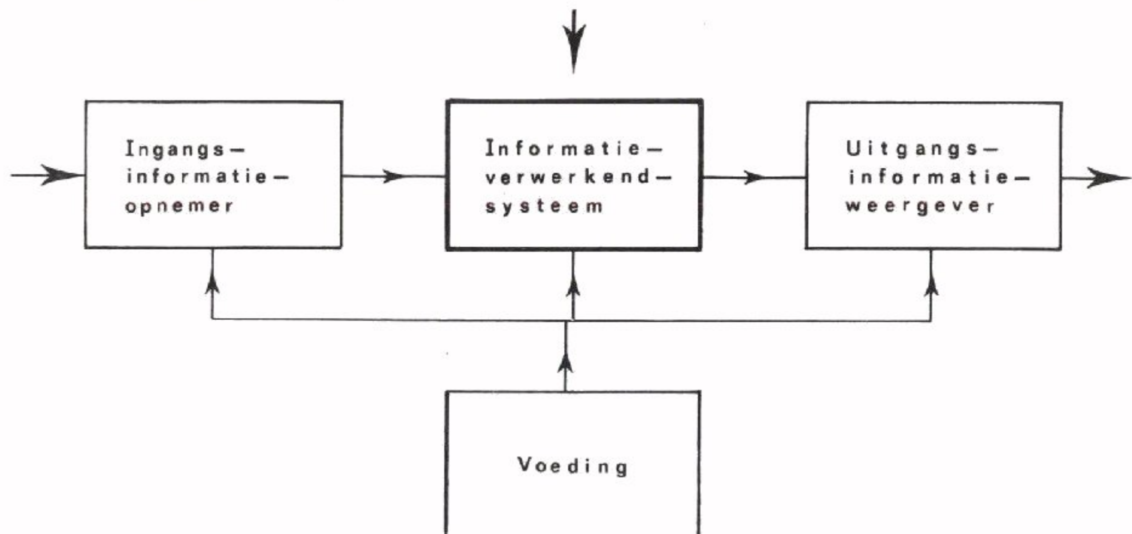
In de twee komende lessen komt de functie *verzwakken* aan de beurt. Bij elektronische informatieverwerking is het soms nodig de informatie kleiner te maken; m.a.w. te "verzwakken". Als bijv. een versterker wordt overstuurd ten gevolge van een te grote ingangsspanning, dan moet deze worden verzwakt.

We onderscheiden *frequentie-onafhankelijke* verzwakkers en *frequentie-afhankelijke* verzwakkers. Bij eerstgenoemden is de verzwakking voor alle frequenties van het toegevoerde signaal dezelfde. Bij laatstgenoemden is de grootte van de verzwakking afhankelijk van de frequentie van het toegevoerde signaal. Frequentie-onafhankelijke verzwakkers vindt men bijv. aan de ingang van een oscilloscoop of aan de uitgang van een generator. De ingangsverzwakker van een oscilloscoop wordt gebruikt als het toegevoerde te groot is. De uitgangsverzwakker van een generator wordt gebruikt als het afgegeven signaal te groot is. De bedoeling van deze verzwakkers is dat de verzwakking voor alle frequenties van de voorkomende spanningen dezelfde is.

Frequentie-afhankelijke verzwakkers (ook wel *filters* genoemd) komen in bijna alle schakelingen voor. Een voorbeeld van een filter is een koppelcondensator tussen twee versterkertrappen (zie C5). Bij dit filter wordt gelijkspanning (frequentie is nul) zeer veel verzwakt en wisselspanning met hoge frequentie bijna niet verzwakt.

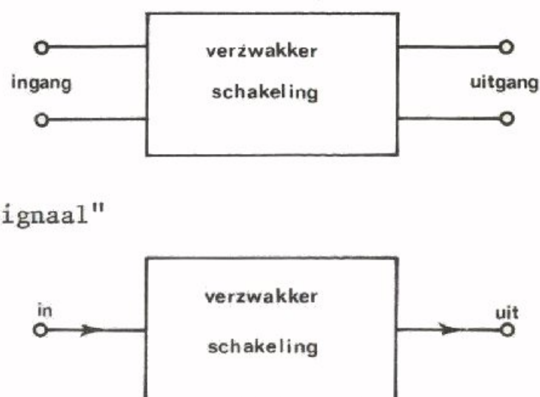
WAAR VERZWAKKERS THUIS HOREN

De functie verzwakken hoort in een analoog systeem bij het blok informatieverwerking (zie figuur).



WAT BEDOELEN WE MET VERZWAKKEN ?

Een verzwakker stellen we voor door een blok met een ingang en een uitgang. Aan de ingang wordt het te verzwakken "ingangssignaal" toegevoerd, aan de uitgang komt het verzwakte signaal als "uitgangssignaal" ter beschikking.



Onder "verzwakken: verstaan we "uit een gegeven signaal een kleiner signaal verkrijgen waarbij de *vorm* en de frequentie van het signaal behouden blijven". Bij een "verzwakker" is het aan de uitgang verkregen signaal dus kleiner dan het ingangssignaal.
We onderscheiden *stroom-*, *spannings-* en *vermogens*verzwakkers. Bij stroomverzwakkers is de uitgangsstroom kleiner dan de ingangsstroom. Bij spanningsverzwakkers is de uitgangsspanning kleiner dan de ingangsspanning. Bij vermogensverzwakkers is het uitgangsvermogen kleiner dan het ingangsvermogen.

De verzwakking van stroomverzwakkers is: $V_i = \frac{i_u}{i_i}$

De verzwakking van spanningsverzwakkers is: $V_u = \frac{u_u}{u_i}$

De verzwakking van vermogensverzwakkers is: $V_p = \frac{P_u}{P_i}$

We merken hierbij op dat het bij een versterker vaak gaat om het *vermogen* dat versterkt wordt. Bij een verzwakker ligt de nadruk meestal op het verzwakken van de *spanning*, of soms van de *stroom*.

Veel uitvoeringen van verzwakkers zijn uitsluitend samengesteld uit passieve componenten. Daarnaast komen ook verzwakkers voor die uit passieve én aktieve componenten zijn opgebouwd. Van beide soorten gaan we voorbeelden geven in de twee verzwakker-lessen.

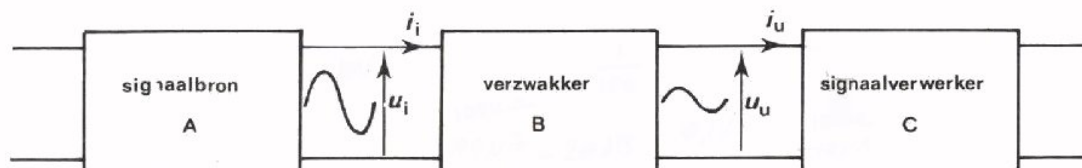
OEFENING

Bij een versterker is A_p **groter/kleiner** dan 1.

Bij een vermogensverzwakker is V_p **groter/kleiner** dan 1.

WELKE VERZWAKKEREIGENSCHAPPEN ZIJN VAN BELANG ?

Een verzwakker bevindt zich als regel tussen een elektronische schakeling die een signaal afgeeft en een andere schakeling die het verzwakte signaal verder verwerkt. De schakeling die een signaal afgeeft kan bijv. een versterkertrap zijn; we noemen deze schakeling in onderstaande tekening signaalbron A. De schakeling die het verzwakte signaal verder verwerkt kan bijv. een andere versterkertrap zijn; in onderstaande tekening is deze schakeling signaalverwerker C genoemd.



Voor een goede samenwerking tussen A, B en C zijn van de verzwakker de volgende eigenschappen van belang.

- De verzwakking V
  De stroomverzwakking V_i voor stroomverzwakkers.
  De spanningsverzwakking V_u voor spanningsverzwakkers.
  De vermogensverzwakking V_p voor vermogensverzwakkers.
- De ingangsweerstand R_i.
- De uitgangsweerstand R_u.

OEFENING

De signaalbron in bovenstaande figuur levert een spanning van 10 V aan de verzwakker.
Van de verzwakker is bekend dat $V_u = 1/100$, $R_i = 100\ \text{k}\Omega$.
De signaalverwerker heeft een ingangsweerstand van 10 kΩ.

Gevraagd:

- Hoe groot is de uitgangsspanning van de verzwakker ? U_u = [mV]
- Bepaal het aan de verzwakker toegevoerde vermogen. P_i = [mW]
- Hoe groot is het uitgangsvermogen van de verzwakker ? P_u = [µW]
- Bereken de vermogensverzwakking. V_p = [ ]
- Hoe groot is de stroomverzwakking ? V_i = [ ]

VERMOGENSVERZWAKKING UITGEDRUKT IN BEL EN DECIBEL

Veronderstel dat het ingangsvermogen van een vermogensverzwakker 1 W is en het uitgangsvermogen 10 mW, dan is de vermogensverzwakking:

$$V_P = \frac{10\ \text{mW}}{1\ \text{W}} = 0{,}01 = 10^{-2}$$

De vermogensverzwakking kan men, evenals de vermogensversterking, uitdrukken in *bel* of *decibel*.

In les C4 hebben we geleerd dat voor vermogens*versterking* geldt:

$$A_P = 100 = 10^2 = 2\ \text{bel (B)} = 20\ \text{decibel (dB)}.$$

$$A_P = 100.000 = 10^5 = 5\ \text{B} = 50\ \text{dB}.$$

$$A_P = 10 = 10^1 = 1\ \text{B} = 10\ \text{dB}.$$

Bij vermogens*verzwakking* gaan we op dezelfde wijze te werk, met dat verschil dat we nu met *negatieve* dB's rekenen.

$$A_P = \frac{1}{100} = 10^{-2} = -\ 20\ \text{decibel (dB)}.$$

$$A_P = \frac{1}{100\ 000} = 10^{-5} = -\ 50\ \text{dB}$$

$$A_P = \frac{1}{10} = 10^{-1} = -\ 10\ \text{dB}$$

Het min-teken geeft aan dat de dB's betrekking hebben op een *verzwakking*; bij positieve dB's hebben we te maken met *versterking*. .

Opmerking: in publicaties over verzwakkers wordt vaak de uitdrukking $V_P = -\ 3$ dB gebruikt.

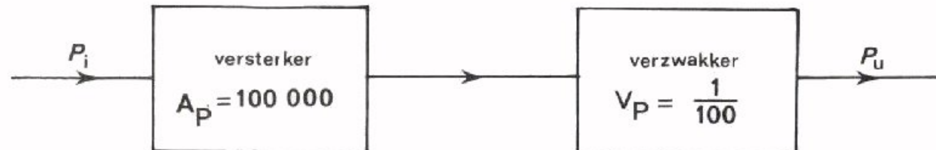
$V_P = -\ 3$ dB betekent: $\frac{P_u}{P_i} = \frac{1}{2}$

OEFENING

$V_P = -\ 20$ dB betekent	$V_P =$
$V_P = -\ 30$ dB betekent	$V_P =$
Als $P_i = 100$ mW en $P_u = 10$ mW	$A_P =$ dB
Als $P_i = 1$ W en $V_P = -\ 30$ dB	$P_u =$ mW

HET OPTELLEN VAN DECIBELS

In onderstaande figuur zijn een versterker en een verzwakker achter elkaar geschakeld. De vermogensversterking van de versterker is bijv. 100.000; de vermogensverzwakking van de verzwakker is bijv. 100.



De totale vermogensversterking van deze twee schakelingen is gelijk aan:

$$\frac{P_u}{P_i} = \frac{100\ 000}{100} = 1000 = 10^3.$$

De totale vermogensversterking kan men dus berekenen door de A_P van de versterker te *delen* door de V_P van de verzwakker.
Hoe bepaalt men de totale vermogensversterking als A_P en V_P in dB's zijn uitgedrukt.

Van de versterker is: $A_P = 100\ 000 = 10^5 = 5\ B = 50\ dB$.

Van de verzwakker is: $V_P = \frac{1}{100} = 10^{-2} = -\ 2B = -\ 20\ dB$.

De totale vermogensversterking is $10^3 = 3\ B = 30\ dB$.

Kennelijk moet men de dB's van de afzonderlijke schakelingen *optellen* om de totale vermogensversterking in dB's te verkijgen; immers
50 dB + (-20dB) = 30 dB.

VOORBEELD

Achter elkaar geschakeld zijn:
Versterker 1 met A_P = 22 dB

Verzwakker 1 met V_P = -6 dB

Versterker 2 met A_P = 25 dB

Verzwakker 2 met V_P = -11 dB

De totale vermogensversterking is 22 + (-6) + 25 + (-11) = 30 dB = 3 B.
A_P(totaal) is dus 1000.

OEFENING

Een filter dat tussen twee gelijke versterkertrappen is geschakeld verzwakt 6 dB. Hoeveel moet elke trap versterken opdat de vermogensversterking van de totale schakeling 30 dB bedraagt ?

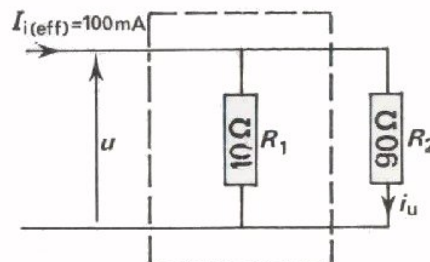
A_P(versterkertrap 1) = A_P (versterkertrap 2) = [dB]

FREQUENTIE ONAFHANKELIJKE VERZWAKKERS

EEN VOORBEELD VAN EEN EENVOUDIGE STROOMVERZWAKKER

Voordat we verder ingaan op de eigenschappen van verzwakkers, gaan we als kennismaking een paar simpele voorbeelden bespreken.

Op dit blad gaan we een *stroomverzwakker* onder de loep nemen. Hiernaast is zo'n verzwakker afgebeeld. Aan de ingang van de verzwakker wordt een sinusvormige stroom i_i toegevoerd. Aan de uitgang komt een kleinere sinusvormige stroom i_u beschikbaar. De vorm van i_u is gelijk aan die van i_i.



De waarde van i_u is als volgt te berekenen:

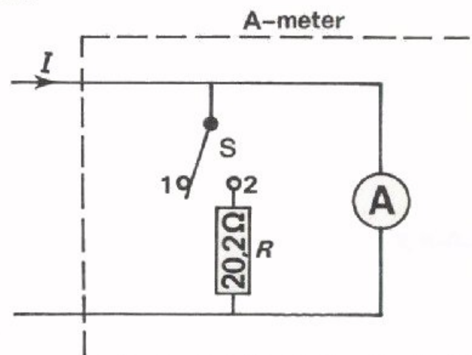
$$i_u = \frac{u}{R_2} = i_i \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_2} = i_i \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

of: $I_u = 100 \text{ mA} \cdot \frac{10}{10 + 90} = 10 \text{ mA}$

De verzwakking is dus: $V_i = \frac{I_u}{I_i} = \frac{1}{10}$.

De afgegeven stroom is dus 10x zo klein als de toegevoerde stroom.

Een praktische toepassing van een stroomverzwakker vindt men in een ampèremeter met verschillende stroombereiken. Hiernaast is het schema van een A-meter met twee stroombereiken getekend. De draaispoelmeter zelf heeft bijv. een R_i van 2 kΩ en geeft een volle uitslag indien er een stroom van 100 μA doorheen vloeit.



In stand 1 van schakelaar S wordt de toegevoerde stroom I niet verzwakt.

Het stroombereik van de A-meter is nu: | 0 tot μA |

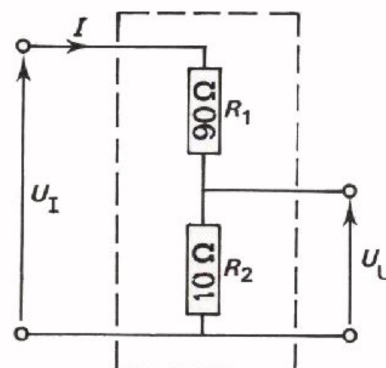
In stand 2 van S wordt I wel verzwakt d.m.v. R.

Het stroombereik van de A-meter is nu: | 0 tot mA |

OPMERKING Daar stroom- en vermogensverzwakkers veel minder voorkomen dan spanningsverzwakkers zal het vervolg van deze lessen alleen over spanningsverzwakkers handelen.

EEN PAAR EENVOUDIGE SPANNINGSVERZWAKKERS

De meest eenvoudige spanningsverzwakker is hiernaast afgebeeld. Aan de ingang van de verzwakker wordt een gelijkspanning U_i toegevoerd (10V). Aan de uitgang komt een kleinere gelijkspanning U_u beschikbaar. De schakeling veroorzaakt dus een verzwakking met behoud van de spanningsvorm.



De grootte van de verzwakking kan men als volgt berekenen:

$$U_U = I \cdot R_2 = \frac{U_I}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = U_I \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

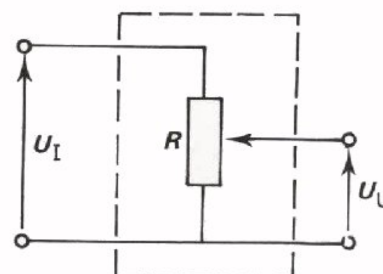
$$U_U = 10\ \text{V} \cdot \frac{10}{10 + 90} = 1\ \text{V}$$

De verzwakking is dus: $V_u = \frac{U_U}{U_I} = \frac{1}{10}$.

De afgegeven spanning is dus 10x zo klein als de toegevoerde spanning.

Hier ziet U een ander voorbeeld van een spanningsverzwakker. Door verschuiving van het loopcontact van de potentiometer R is de uitgangsspanning continu regelbaar. Voor deze verzwakker geldt:

$U_U \leq U_I$, zodat $V_u \leq 1$

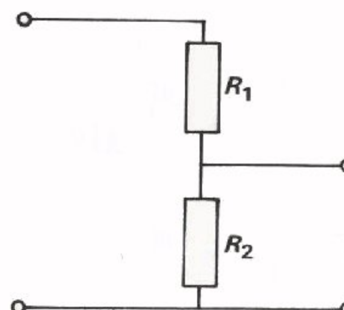


OEFENING

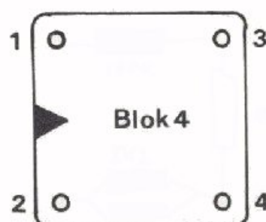
Bereken de waarden van de verzwakkerweerstanden R_1 en R_2 als gegeven is dat de ingangsweerstand 8 kΩ is en $V_u = \frac{1}{8}$.

R_1 = [ ] kΩ

R_2 = [ ] kΩ



OPDRACHT: METEN AAN EEN SPANNINGSVERZWAKKER



- Breng blok 4 aan op Uw paneel. Dit blok bevat een verzwakker met twee uitgangen. Het ingangssignaal moet tussen de punten 1 en 2 worden toegevoerd. De uitgangssignalen komen ter beschikking tussen 3 en 2 resp, 4 en 2.

- Voer alle spanningsmetingen uit m.b.v. een oscilloscoop, en alle weerstandsmetingen m.b.v. de Ohmmeter van Uw universeelmeter.

- Leg aan de ingang van de verzwakker een sinusvormige wisselspanning van U_{it} = 10 V bij f = 1 kHz.

- Meet de uitgangsspanning tussen 3 en 2 U_{u3t} = [V]

  dus: V_{u3} = [ ]

- Meet bij dezelfde u_i de uitgangsspanning tussen 4 en 2.

  U_{u4t} = [V]

  dus: V_{u4} = [ ]

- Maak de generator los van de verzwakker.
  Meet achtereenvolgens de ingangsweerstand van de verzwakker, de uitgangsweerstand tussen 3 en 2, en de uitgangsweerstand tussen 4 en 2.

R_i = [kΩ] R_{u3} = [kΩ] R_{u4} = [kΩ]

CONCLUSIE

R_{u3} en R_{u4} zij niet even groot.
Soms stelt men dat de uitgangen van een verzwakker wél een even grote uitgangsweerstand kan bezitten.
In dit geval zijn speciale verzwakkerschakelingen nodig.
In het vervolg van deze les komen we hierop terug.

INGANGS- EN UITGANGSWEERSTAND VAN SPANNINGSVERZWAKKERS

Zoals eerder vermeld heeft men in de praktijk meestal te doen met *spannings-verzwakkers*. Men treft ze op drie manieren aan.

1. Als "afzonderlijke verzwakker" tussen de signaalbron en de signaalverwerker. Voorbeeld is de verzwakker-meetkop van een oscilloscoop die tussen het meetobject en de oscilloscoop wordt geschakeld.



2. Als "ingangsverzwakker" die deel uitmaakt van de signaalverwerker. Verzwakker en signaalverwerker zitten in één en dezelfde kast. Voorbeeld is de Y-verzwakker, die in een oscilloscoop is gebouwd.



3. Als "uitgangsverzwakker" die deel uitmaakt van de signaal-bron. Verzwakker en signaal-bron zitten in één en dezelfde kast. Voorbeelden zijn de ver-zwakkers van meetgenerators.



Gewenste eigenschappen van de "afzonderlijke verzwakkers" zijn:

- een *grote* R_i, zodat de voorafgaande bron niet zwaar wordt belast. Als er meer dan één verzwakkerstand is, dan moet R_i in al die standen groot zijn, en bij voorkeur steeds even groot.
- een *kleine* R_u, zodat de verzwakker zelf door de erop volgende signaalver-werker niet te zwaar wordt belast. Heeft de verzwakker meer dan één stand, dan moet R_u in al die standen klein zijn, en bij voorkeur steeds even klein.

Welke eigenschappen zijn van belang voor "ingangsverzwakkers" en welke voor "uitgangsverzwakkers" ?.

Voor de "ingangsverzwakker" ligt binnen het apparaat vast wat er op de verzwakker volgt; daar kan niets aan veranderen. Wel kan de voorafgaande bron de ene keer anders zijn dan de andere keer. Voor deze verzwakker is daarom van belang dat R_i groot is, en bovendien in alle standen gelijke waarde heeft.

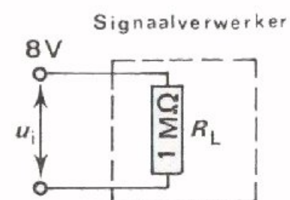
Voor de "uitgangsverzwakker" ligt binnen het apparaat vast wat er aan de verzwakker voorafgaat, daar kan nu niets aan veranderen. Wel kan de belasting van de verzwakker de ene keer anders zijn dan de andere keer. Voor deze verzwakker is daarom van belang dat de R_u klein is, en bovendien in alle standen een gelijke waarde heeft.

Op de volgende pagina's zullen we nagaan op welke wijze verzwakkers zijn samengesteld die in alle verzwakkerstanden een even grote ingangsweerstand óf een even grote uitgangsweerstand bezitten.

VOORBEELD VAN EEN INGANGSVERZWAKKER

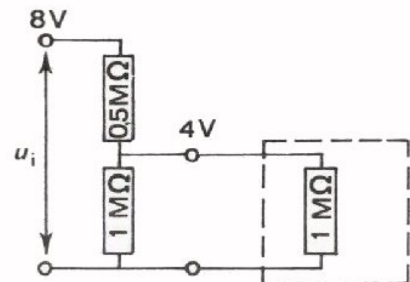
We gaan een nogal ingewikkeld voorbeeld van een ingangsverzwakker met 3 verzwakkerstanden bespreken. Om de schakeling goed te doorzien, beginnen we met een klein deel, dat daarna telkens wordt uitgebreid.

De verzwakker gaat vooraf aan een signaalverwerker die hiernaast is aangeduid met de "streeplijnrechthoek". De verwerker heeft een ingangsweerstand R_L van 1 MΩ. Als de te verwerken spanning $U_{i(eff)}$ = 8 V direct (zonder de verzwakker) aan de verwerker wordt toegevoerd, is $R_i = R_L$ = 1 MΩ.

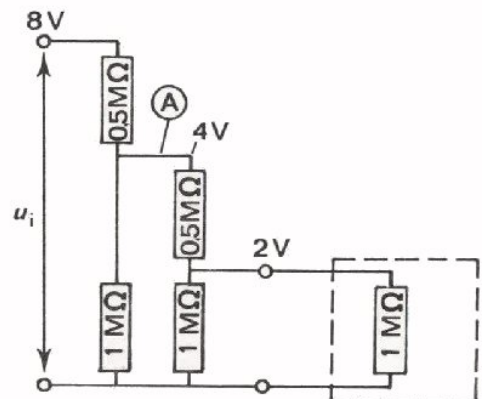


De ingangsspanning wordt een factor *2* verzwakt ($V_u = \frac{1}{2}$) door toevoeging van 0,5 MΩ en 1 MΩ zoals hiernaast getekend. Ook nu is R_i = 1 MΩ. Immers:

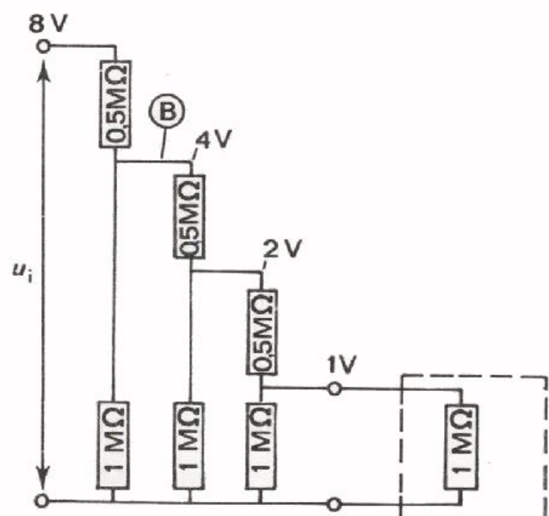
$$R_i = 0{,}5\ \text{M} + \frac{1\text{M} \cdot 1\text{M}}{1\text{M} + 1\text{M}} = 1\ \text{M}\Omega$$



u_i wordt een factor *4* verzwakt ($V_u = \frac{1}{4}$) door opnieuw twee weerstanden van 0,5 MΩ en 1 MΩ aan de ingang bij te schakelen. (zie nevenstaande figuur).
Dat ook nu R_i = 1 MΩ is gemakkelijk in te zien als men bedenkt, dat de schakeling *rechts* van punt A een weerstandswaarde van 1 MΩ vertegenwoordigt.



u_i wordt een factor *8* verzwakt ($V_u = \frac{1}{8}$) door nogmaals dezelfde weerstandswaarden toe te voegen (zie figuur). Ook nu is R_i = 1 MΩ. Immers rechts van punt B is de totaal-weerstand 1 MΩ.



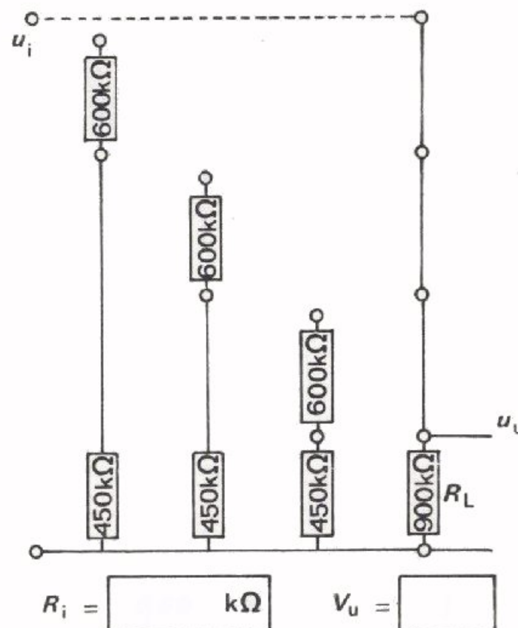
CONCLUSIE

De ingangsweerstand van de ingangsverzwakker blijft steeds 1MΩ onafhankelijk van de verzwakking.

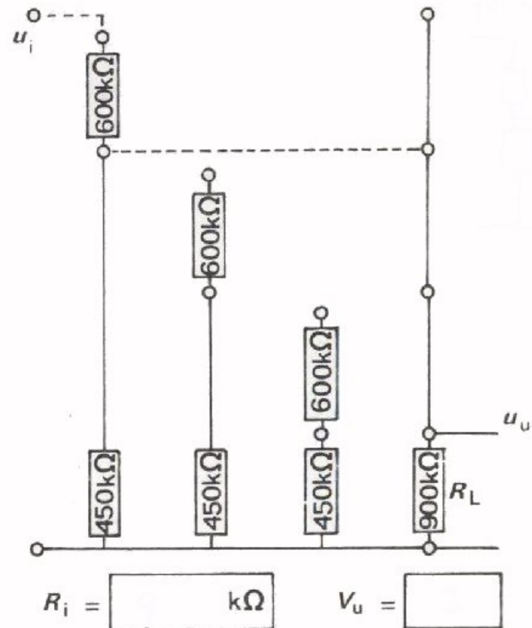
VERVOLG INGANGSVERZWAKKER

Bij de ingangsverzwakker volgens blad 12 verkrijgt men een andere verzwakking door twee weerstanden erbij of eraf te schakelen. In de praktijk gebeurt dit m.b.v. een stappenschakelaar. In onderstaande tekening is met *stippellijnen* aangegeven welke verbinding door de schakelaar moet worden gemaakt.

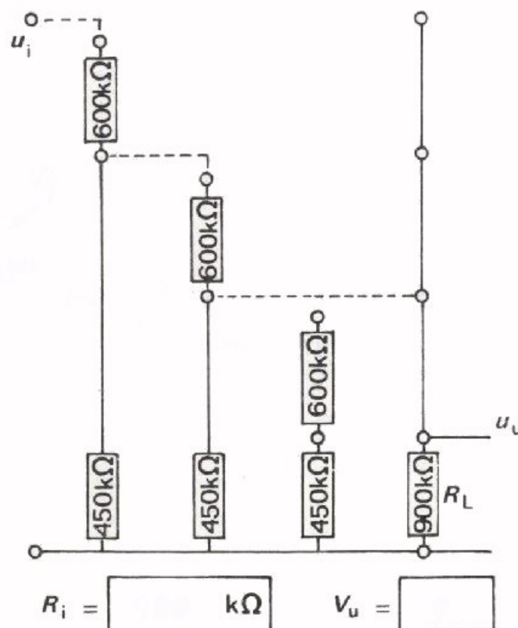
De verzwakker wordt *niet* gebruikt



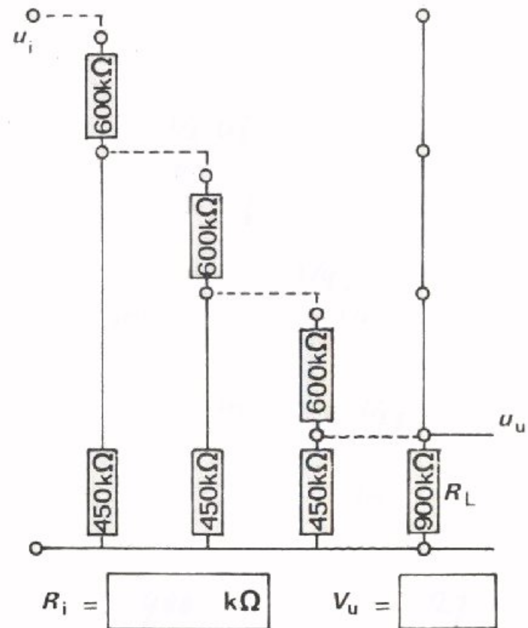
1e stand met verzwakker.



2e stand met verzwakker



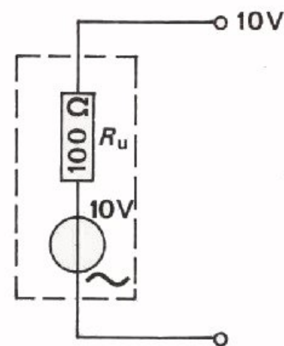
3e stand mec verzwakker



VOORBEELD VAN EEN UITGANGSVERZWAKKER

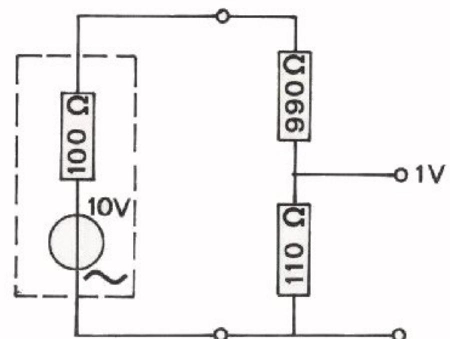
Zoals eerder vermeld dient een uitgangsverzwakker een kleine R_u te hebben die bovendien in alle verzwakkerstanden bij voorkeur even groot moet zijn. We gaan nu een uitgangsverzwakker met drie verzwakkerstanden bespreken, waarvan de R_u in alle standen gelijk is. We doen dit op dezelfde manier als bij de eerder besproken ingangsverzwakker.

De verzwakker is achter een signaalbron geschakeld, die hiernaast met de "streeplijnrechtoek" is weergegeven. De signaalbron heeft een uitgangsweerstand van R_u = 100 Ω. Als de spanning van de bron zonder verzwakking wordt afgenomen dan is $U_{u(eff)}$ = 10 V en R_u = 100 Ω.

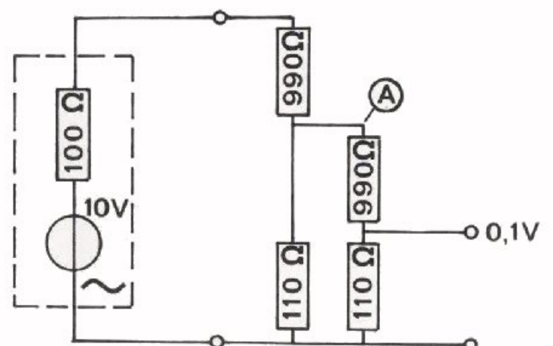


De spanning van de bron wordt een factor *10* verzwakt door toevoeging van 990Ω en 110Ω zoals hiernaast getekend. Ook nu is R_u = 100Ω. Immers:

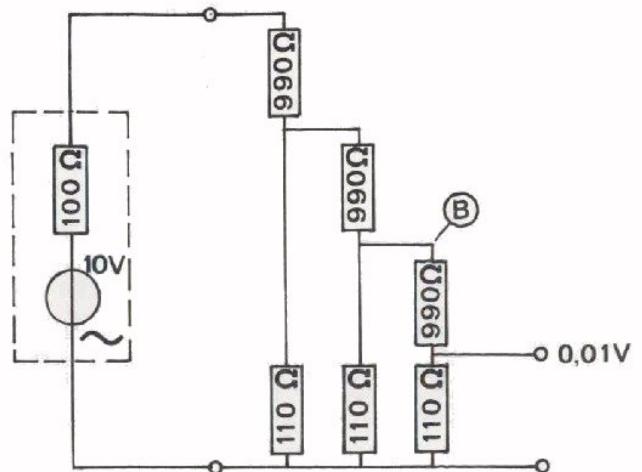
R_u = 110//(990 + 100) = 100 Ω



u wordt een factor *100* verzwakt door opnieuw twee weerstanden van 990Ω en 110Ω bij te schakelen (zie nevenstaande figuur). Dat ook nu R_u = 100Ω is gemakkelijk in te zien als men bedenkt, dat de schakeling *links* van punt A een weerstandswaarde van 100Ω vertegenwoordigt.



u wordt een factor *1000* verzwakt door nogmaals dezelfde weerstandswaarden toe te voegen (zie figuur). Ook nu is R_u = 100Ω. Immers links van punt B is de totaal weerstand 100Ω.

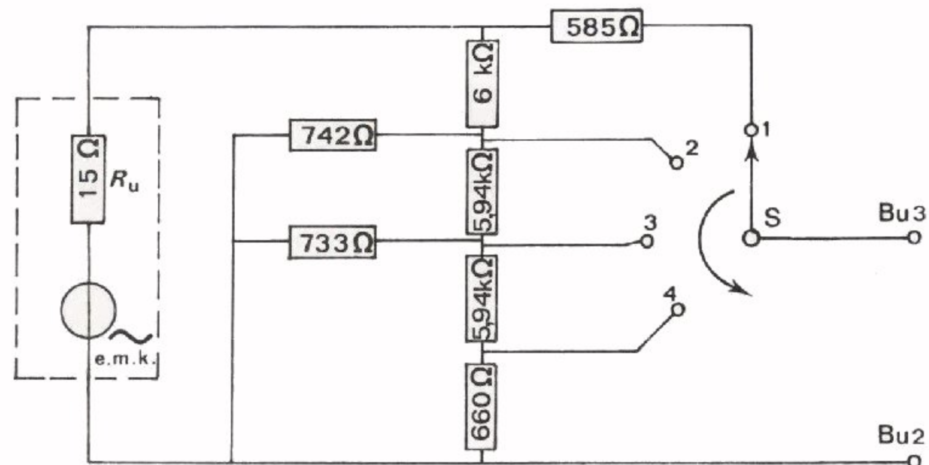


CONCLUSIE

De uitgangsweerstand van de uitgangsverzwakker blijft steeds 100 Ω onafhankelijk van de verzwakking.

EEN ANDER VOORBEELD VAN EEN UITGANGSVERZWAKKER

Als tweede voorbeeld van een uitgangsverzwakker nemen we de stappenverzwakker van een gangbare *RC*-generator.
Het complete principeschema van de *RC*-generator is op het volgende blad afgebeeld. De stappenverzwakker met een R_u van 600 Ω is door een streeplijn omgeven.
Hieronder hebben we de stappenverzwakker nog eens overzichtelijker getekend. De rest van de schakeling die de wisselspanning aan de verzwakker toevoert, is voorgesteld als een wisselspanningsbron met een zekere e.m.k. en een R_u = 15 Ω. De e.m.k. is met behulp van de "continu verzwakker" te regelen (dit is R_1 in het schema op blad 17).



De weerstanden van de stappenverzwakker zijn zó gekozen, dat in elke stand geldt: R_u = 600Ω. Heel gemakkelijk is dat in te zien in de boven getekende stand 1.

$$R_{u1} = R_u + 585\Omega = 15\Omega + 585\Omega = 600\Omega.$$

We hebben hierbij de parallel aan R_u staande weerstanden (die ruim 6 kΩ vertegenwoordigen) verwaarloosd. Dit is toelaatbaar omdat 6000Ω >> 15Ω.
In stand 2 van de schakelaar is de uitgangsweerstand 742Ω met daaraan parallel twee takken van elk ca. 6 kΩ (ga dit zelf na).

$R_{u2} \simeq 742\Omega \;//\; 3\text{ k}\Omega$ | Ω |

In stand 3 van de schakelaar is de uitgangsweerstand 733Ω met ook hier weer parallel twee takken van ca. 6 kΩ (ga dit na).

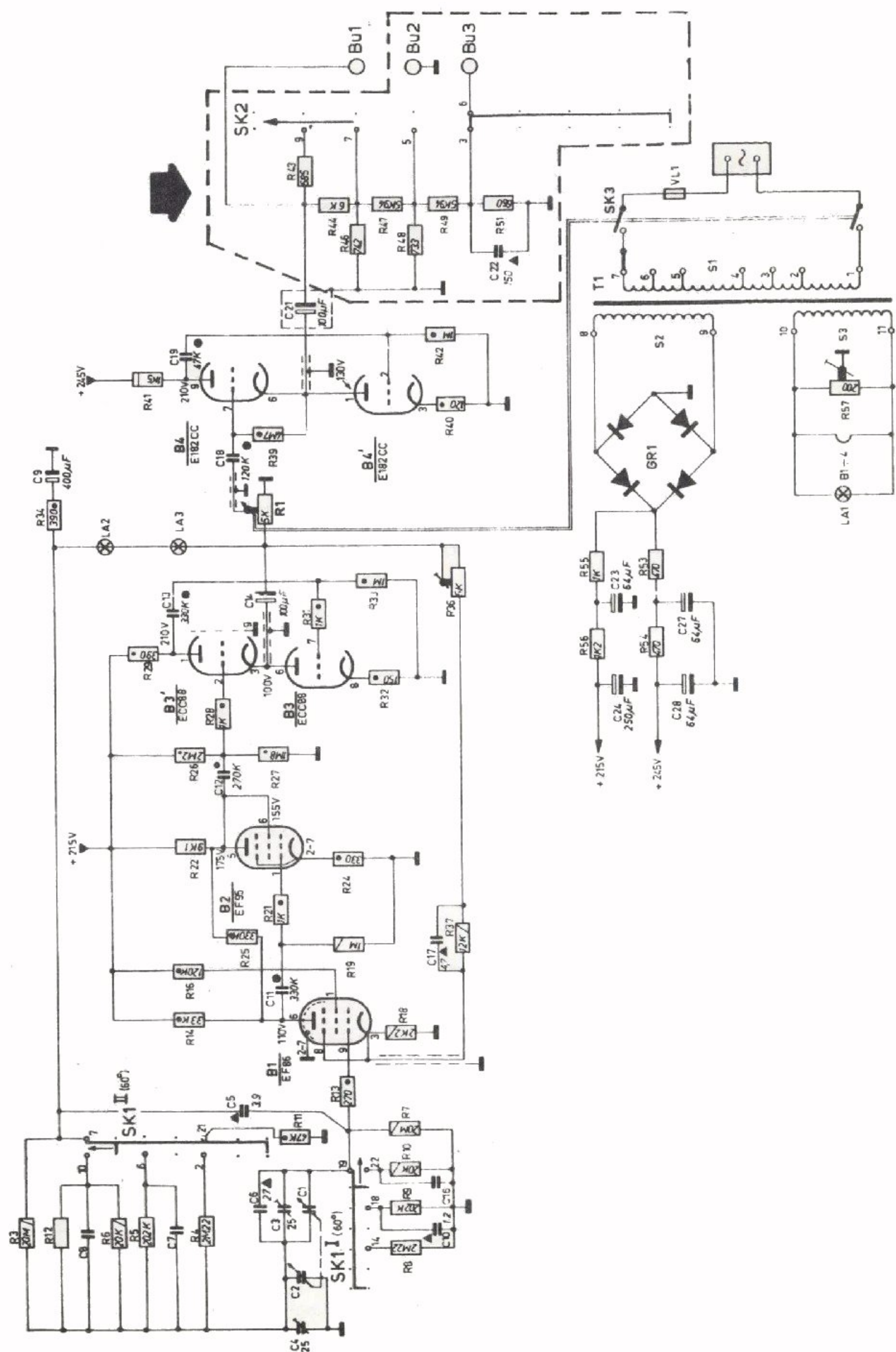
$R_{u3} \simeq 733\Omega \;//\; 3\text{ k}\Omega \simeq$ | Ω |

In stand 4 van de schakelaar is R_u 660Ω parallel aan ca. 6 kΩ.

$R_{u4} \simeq 660\Omega \;//\; 6\text{ k}\Omega \simeq$ | Ω |

Deze uitgangsverzwakker is schakeltechnisch eenvoudiger dan die van blad 12 (er behoeven minder punten omgeschakeld te worden). De toegepaste weerstanden hebben evenwel uiteenlopende waarden (in de verzwakker van blad 12 zijn slechts twee weerstandswaarden nodig.).

RC-GENERATOR MET UITGANGSVERZWAKKER



OPDRACHT: HET CONTROLEREN VAN DE R_i VAN EEN OSCILLOSCOOP

- Gebruik bij deze meting een oscilloscoop met een ingangsweerstand van 1 MΩ.

- Sluit een sinusvormige spanning met een effectieve waarde van ca. 10 V (freq. 1 kHz) aan op de ingang van de oscilloscoop.

  Meet de beeldhoogte. h = [div.]

- Plaats in serie met de ingang van de oscilloscoop een weerstand van 1 MΩ en controleer of de beeldhoogte tot op de helft daalt.

  Conclusie: R_i (oscilloscoop) = [MΩ]

- Geef een korte beschrijving van deze meetmethode.

- Herhaal bovenstaande meting nog bij twee andere verzwakkerstanden.

CONCLUSIE de ingangsweerstand van de ingangsverzwakker van de oscilloscoop is in diverse standen **gelijk/ongelijk**

OPDRACHT: HET CONTROLEREN VAN DE R_u VAN DE LF-GENERATOR

- Gebruik bij deze meting een LF-generator met een uitgangsweerstand van 600Ω.

- Verbindt de 600Ω - uitgang van de generator met de ingang van een oscilloscoop. Maak de uitgangsspanning maximum (freq. 1 kHz).

  Meet de beeldhoogte. h = [div.]

- Belast de generator met 600Ω (1 weerstand van 1 kΩ parallel met een weerstand van 1,5 kΩ) en controleer of de beeldhoogte tot op de helft is gedaa

  Conclusie: R_u(generator) = [Ω]

- Verklaar in het kort deze meetmethode,

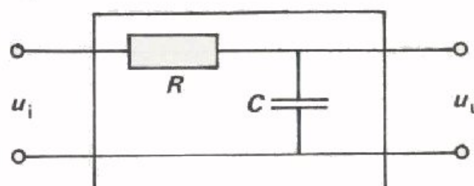
- Herhaal de meting bij nog twee andere verzwakkerstanden.

CONCLUSIE de uitgangsweerstand van de uitgangsverzwakker van de generator is in diverse standen gelijk/ongelijk

FREQUENTIE-AFHANKELIJKE VERZWAKKERS

Vanaf blad 7 t/m blad 18 hebben we gesproken over frequentie-onafhankelijke verzwakkers. Deze verzwakkers zijn uitgevoerd met weerstanden waardoor de verzwakking voor alle frequenties van het toegevoerde signaal dezelfde is. We gaan nu een paar pagina's besteden aan frequentie-afhankelijke verzwakkers; ook wel filter genoemd. Dit soort verzwakkers heeft men zodanig samengesteld dat de grootte van de verzwakking wél afhangt van de frequentie van het toegevoerde signaal.

Een voorbeeld van een frequentie-afhankelijke verzwakker is hiernaast afgebeeld. We noemen deze schakeling een *laagdoorlatend RC*-filter.



De naam "laagdoorlatend" zal duidelijk worden als men bedenkt, dat:

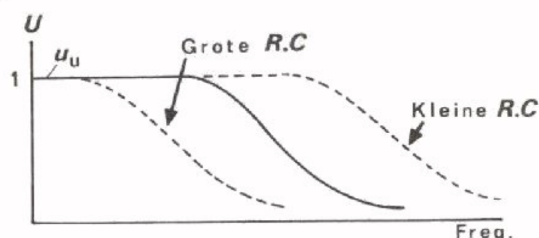
- bij de frequentie nul (gelijkspanning) het filter niet verzwakt, dus alle spanning doorlaat.

  Bij $f = 0 \rightarrow \frac{1}{\omega C} = \infty \longrightarrow u_u = u_i$

- bij zeer hoge frequenties het filter zeer veel verzwakt, dus bijna geen spanning doorlaat.

  Bij $f = \infty \rightarrow \frac{1}{\omega C} = 0 \longrightarrow u_u = 0$

De grootte van de uitgangsspanning bij uiteenlopende frequenties is in nevenstaande grafiek weergegeven. Naarmate R en C grotere waarden hebben, zal het filter minder "hoog-frequent" doorlaten.

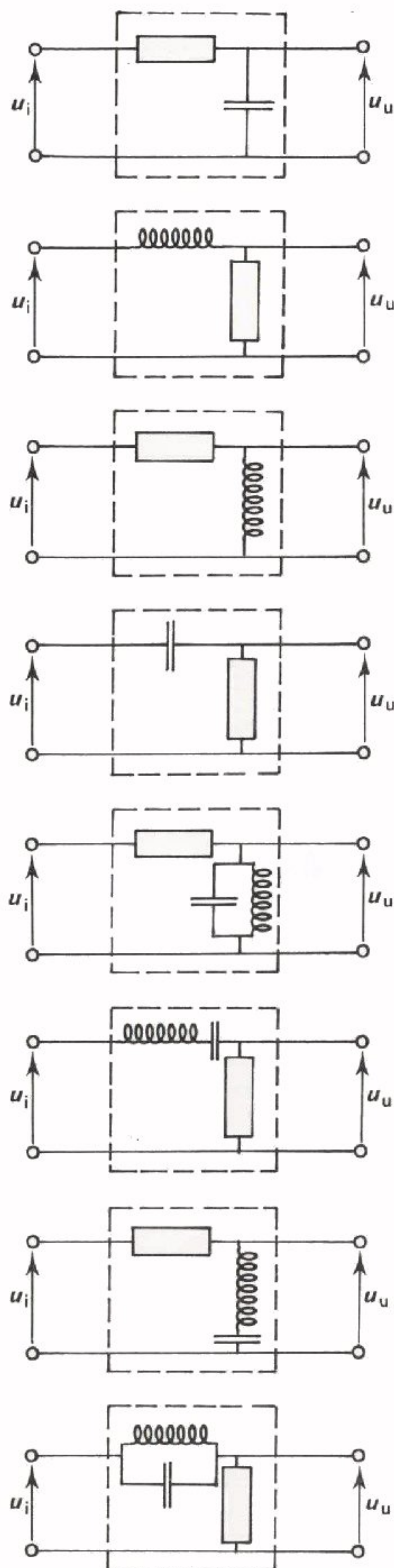


Elektronische filters worden onderscheiden in:

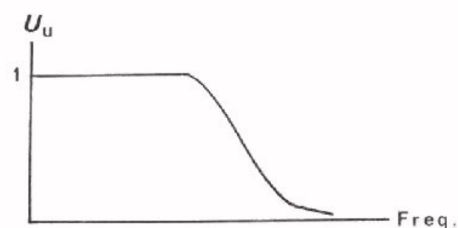
- laagdoorlatende filters,
- hoogdoorlatende filters,
- banddoorlatende filters,
- bandonderdrukkende filters,

Op het volgende blad geven we een overzicht van deze filter en hun eigenschappen. Als U de werking van deze schakeling niet goed begrijpt, dient U een deel van de wisselstroomtheorie (de netwerktheorie) nog eens op te halen.

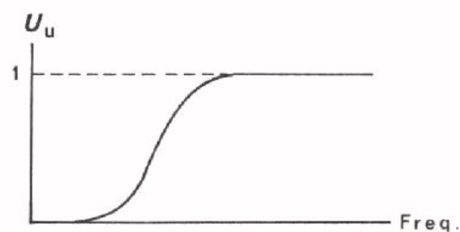
OVERZICHT VAN ELEKTRONISCHE FILTERS



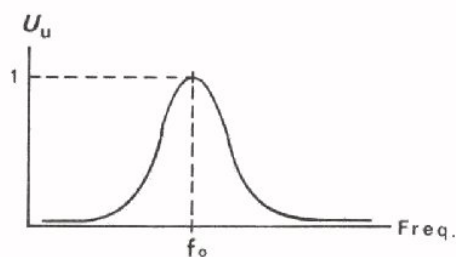
LAAGDOORLATENDE FILTERS



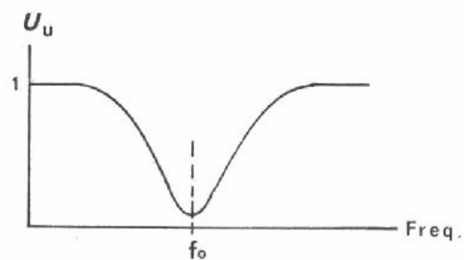
HOOGDOORLATENDE FILTERS



BANDDOORLATENDE FILTERS



BANDONDERDRUKKENDE FILTERS



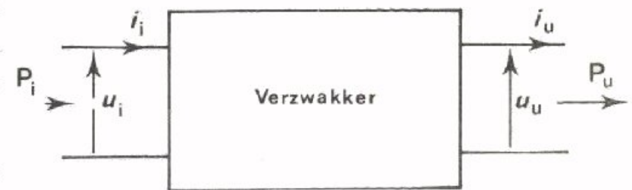
SAMENVATTING

- Onder *verzwakken* verstaat men het verminderen van de grootte van een signaal (stroom, spanning of vermogen) zonder dat daarbij de vorm verandert.

- De stroomverzwakking is: $V_i = \frac{i_u}{i_i}$

  De spanningsverzwakking is: $V_u = \frac{u_u}{u_i}$

  De vermogensverzwakking is: $V_P = \frac{P_u}{P_i}$

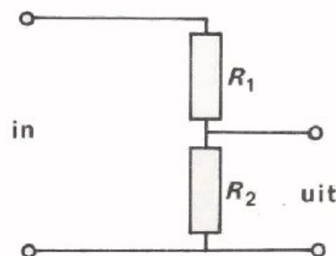


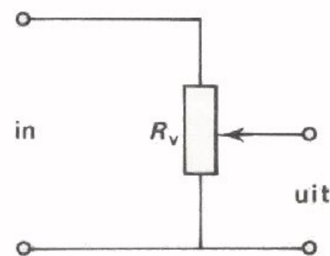
- De vermogensverzwakking wordt vaak in dB's uitgedrukt.

  $V_P = \frac{1}{100} = 10^{-2} = -2$ B $= -20$ dB; $V_P = \frac{1}{10\ 000} = 10^{-4} = -4$ B $= -40$ dB.

  Bij achter elkaar geschakelde verzwakkers (en versterkers) berekent men de totale vermogensversterking door de dB's van de afzonderlijke schakelingen op te tellen.

- Spanningsverzwakkers worden het meest toegepast. Stroom- en vermogensverzwakkers komen minder voor. De eenvoudigste verzwakkers zijn de spanningsdelers, vast of continu regelaaar:





- Men onderscheidt frequentie-onafhankelijke verzwakkers en frequentie-afhankelijke verzwakkers (of filters).

- Belangrijke frequentie-onafhankelijke spanningsverzwakkers zijn: ingangsverzwakkers en uitgangsverzwakkers.

  Ingangsverzwakkers vindt men aan de ingang van een elektronische schakel ling. Bij deze verzwakkers is van belang:
  - een hoge ingangsweerstand
  - een constante ingangsweerstand onafhankelijk van de verzwakkerstand.

  Uitgangsverzwakkers worden aan de uitgang van een schakeling toegepast. Bij deze verzwakkers is belangrijk:
  - een lage uitgangsweerstand,
  - een constante uitgangsweerstand onafhankelijk van de verzwakkerstand.

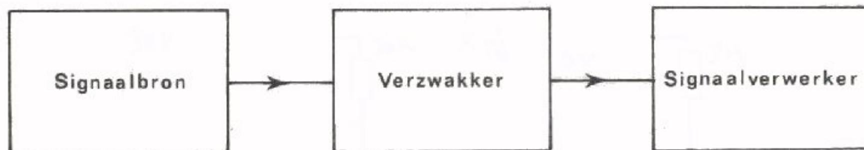
- Frequentie-afhankelijke verzwakkers worden verdeeld in:
  - laagdoorlatende filters,
  - hoogdoorlatende filters,
  - banddoorlatende filters,
  - bandonderdrukkende filters.

NAAM:

KLAS:

OEFENINGEN

1.



De signaalbron levert een spanning van 30 V.

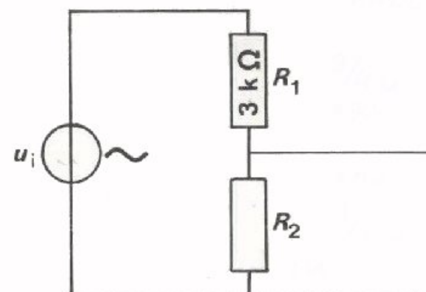
Van de verzwakker is gegeven dat $V_u = \frac{1}{10}$, R_i = 30 kΩ.

De signaalverwerker heeft een R_i van 3 kΩ.

- Bepaald de uitgangsspanning van de verzwakker u_u = V
- Bereken het aan de verzwakker toegevoerde vermogen. P_i = mW
- Hoe groot is het uitgangsvermogen van de verzwakker ? P_u = mW
- Bereken de vermogens verzwakking in dB V_p = dB

2. Van deze verzwakker is in onbelaste toestand:

$V_u = \frac{1}{4}$



- Bereken R_2

  R_2 = kΩ

- Hoe groot is de R_i ?

  R_i = kΩ

- Bepaald de R_u.

  R_u = kΩ

- Hoe groot wordt de verzwakking als de uitgang van de verzwakker wordt belast met een weerstand van 1 kΩ?

  V_u =

3. Bereken van deze schakeling de spanningsverzwakking in onbelaste toestand in de standen 1, 2, 3, 4 en 5.

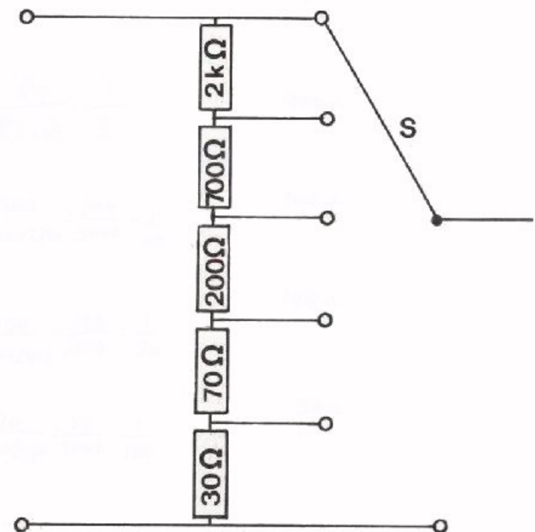
V_u(stand 1):

V_u(stand 2):

V_u(stand 3):

V_u(stand 4):

V_u(stand 5):



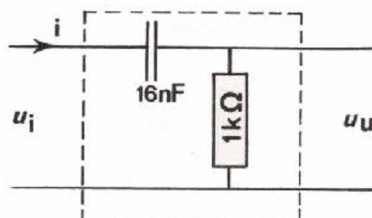
4. In een analoog systeem zijn achter elkaar geschakeld:
   - een verzwakker met V_p = -8 dB
   - een versterker met A_p = 25 dB
   - een versterker met A_p = 17 dB
   - een verzwakker met V_p = -14 dB

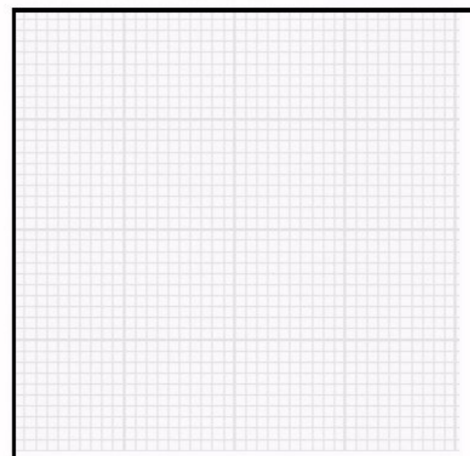
   Bereken de totale vermogensversterking. A_p(totaal) = dB

   A_p(totaal) uitgedrukt in een verhoudingsgetal:

5. Onderstaande verzwakker is een ______ -doorlatend filter.

   Teken op bijgaand grafieken-papier een vectordiagram met u_i, u_c en u_U bij een frequentie van 10 kHz.





De spanningsverzwakking van het filter bij 10 kHz is:

V_u =

C 10

V E R Z W A K K E R S C H A K E L I N G E N I I

E N I G E B I J Z O N D E R E V E R Z W A K K E R S

DE BELANGRIJKSTE PUNTEN UIT DE VORIGE LES

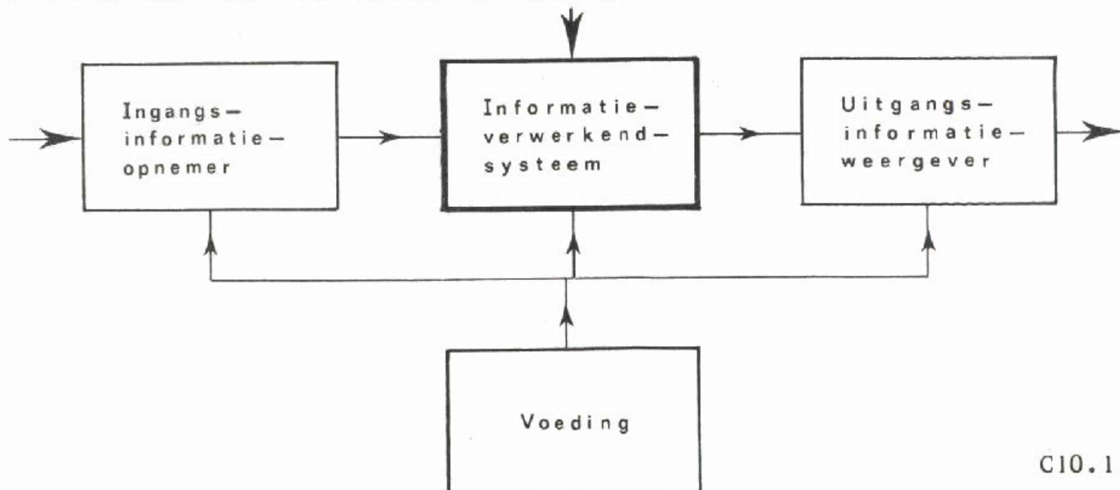
In de vorige les zijn we begonnen met de functie "verzwakken".

- Onder "verzwakken" verstaan we het verminderen van een elektrisch signaal met behoud van de vorm van het signaal.
- We hebben zowel frequentie-onafhankelijke als frequentie-afhankelijke verzwakkers behandeld.
  Verder hebben we onderscheid gemaakt tussen stroom-, spannings- en vermogensverzwakking. Daar spanningsverzwakking in de praktijk het meest voorkomt hebben we ons in hoofdzaak beperkt tot spanningsverzwakkers.
- Een verzwakker wordt meestal voorafgegaan door een signaalgever en belast door een signaal verwerker.
  In verband hiermee zijn de belangrijkste eigenschappen:
  de ingangsweerstand, de uitgangsweerstand en de verzwakking.
- Bij ingangsverzwakkers is een hoge ingangsweerstand van belang.
  Bij uitgangsverzwakkers is een lage uitgangsweerstand gewenst.

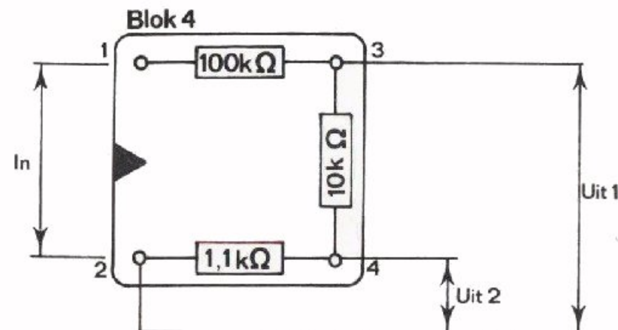
WAT GAAN WE IN DEZE LES BEHANDELEN ?

We gaan twee bijzondere spanningsversterkers onder de loep nemen. Het zijn weerstandsverzwakkers, waarvan we steeds hebben aangenomen dat de grootte van de verzwakking onafhankelijk van de frequentie is. Aan de hand van een aantal metingen zullen we echter merken dat deze veronderstelling niet juist is; bij hoge frequenties gaat de verzwakking van een weerstandsverzwakker afwijken. Dit wordt in hoofdzaak veroorzaakt door parasitaire capaciteiten van de schakeling waarin de verzwakker is opgenomen. Deze capaciteiten kunnen we niet wegwerken. Wél kunnen we de invloed ervan tot een minimum beperken. In deze les zullen we dat leren.

VERZWAKKEN IS EEN ONDERDEEL VAN INFORMATIE-VERWERKEN



OPDRACHT: HET METEN AAN EEN WEERSTANDSVERZWAKKER BIJ UITEENLOPENDE FREQUENTIES



- Plaats blok 4 op Uw paneel. Deze verzwakker is opgebouwd uit weerstanden. Het principeschema is hierboven weergegeven.
- Leg een sinusvormige spanning van 10 V (top-waarde) aan de ingang van de verzwakker. Meet de spanning op uitgang 1 m.b.v. een oscilloscoop (zonder meetkop). Voer deze meting uit bij de frequenties vermeld in tabel 1.
- Plaats de meetresultaten in onderstaande tabel 1.
- Zet de meetresultaten ook uit in een grafiek op het volgende blad.

  Conclusie: De spanning van de verzwakker op uitgang 1 is bij 1 MHz

  | aanzienlijk groter/aanzienlijk kleiner/nagenoeg gelijk | t.o.v. die

  bij lage frequenties.

- Herhaal voorgaande metingen op uitgang 2.
- Vul tabel 2 in.
- Zet $U_{u2(t)}$ uit in een grafiek (zie volgend blad).

  Conclusie: De spanning van de verzwakker op uitgang 2 is bij 1 MHz

  | aanzienlijk groter/aanzienlijk kleiner/nagenoeg gelijk | t.o.v. die

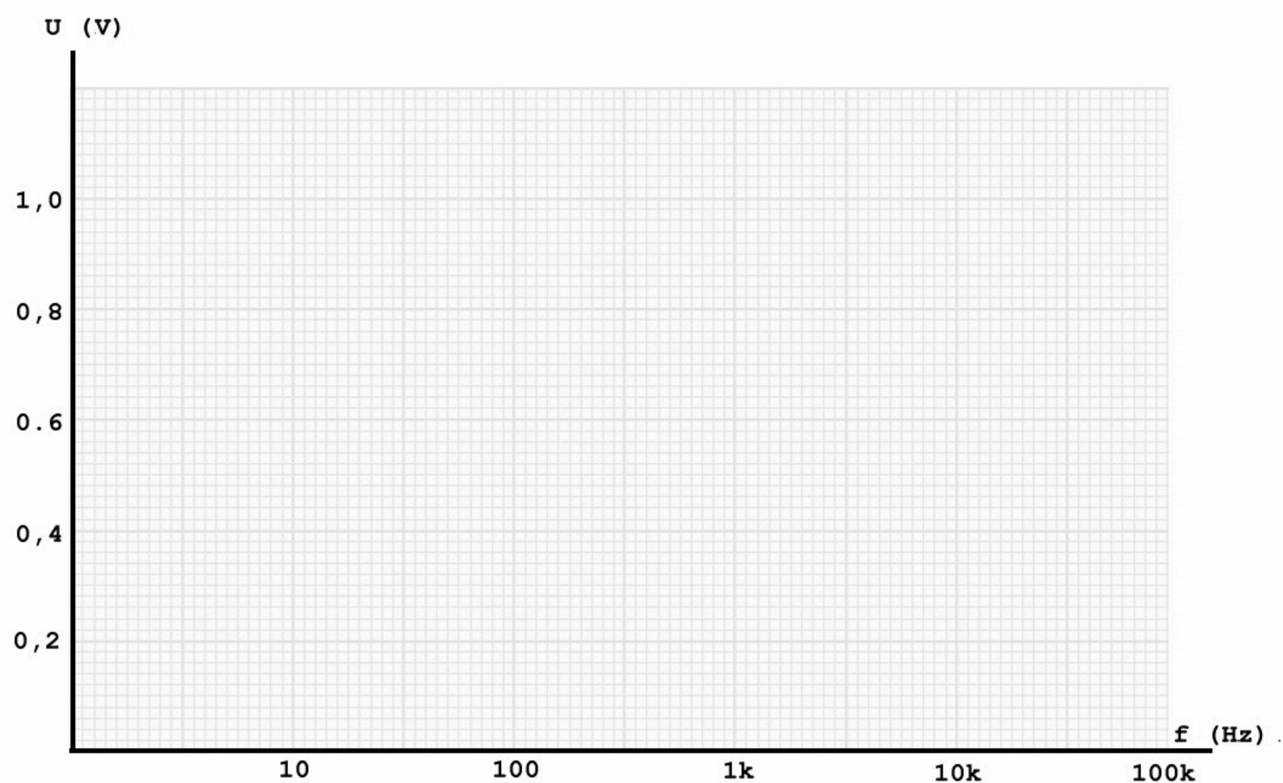
  bij lage frequenties.

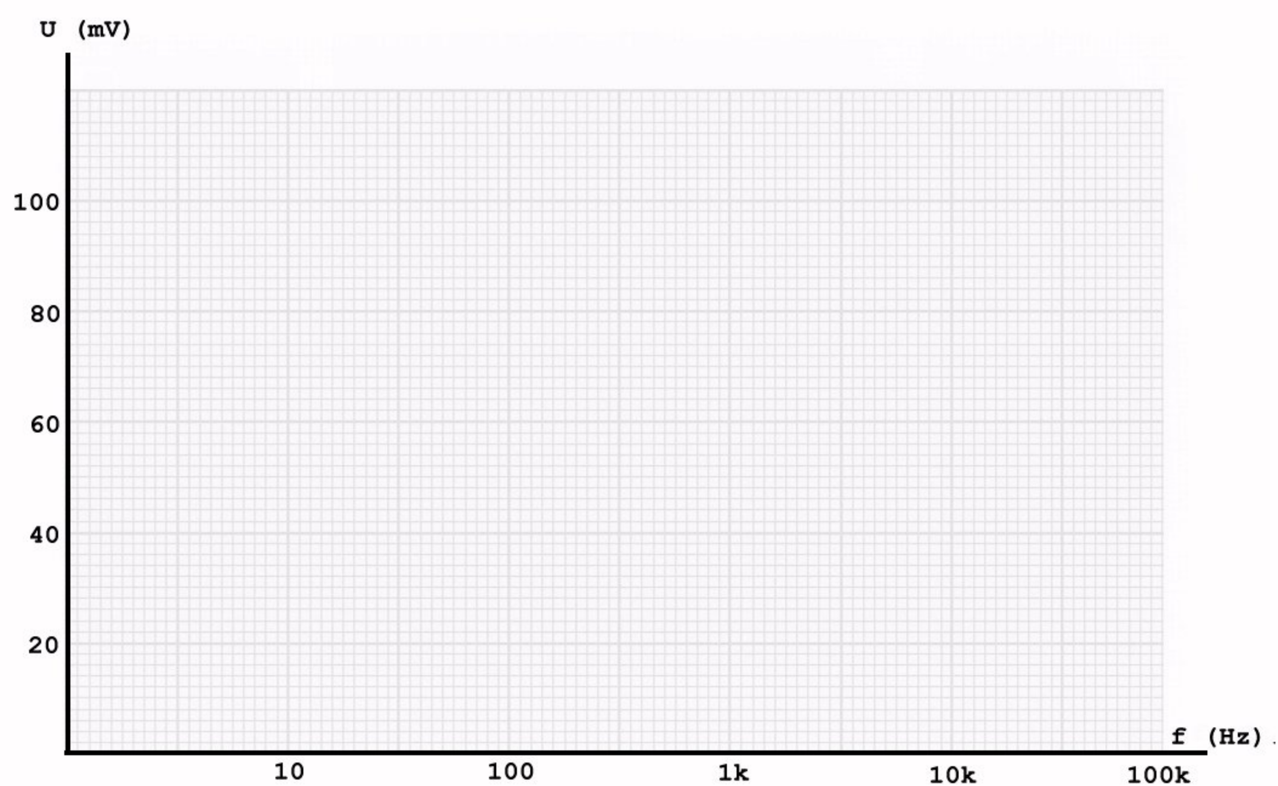
Tabel 1

frequentie (Hz)	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
$U_{u1(t)}$ (volt)					

Tabel 2

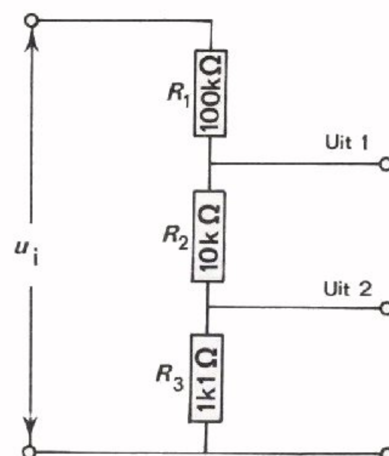
frequentie (Hz)	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
$U_{u2(t)}$ (mV)					


U (V)
1,0
0,8
0.6
0,4
0,2
f (Hz)
10
100
1k
10k
100k

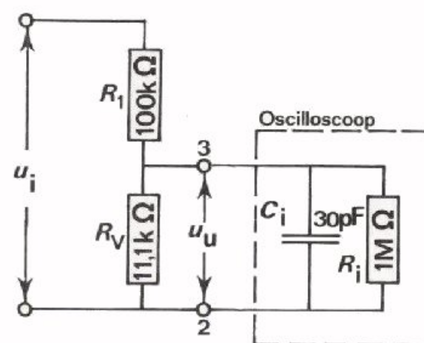

U (mV)
100
80
60
40
20
f (Hz)
10
100
1k
10k
100k

WAAROM AFNAME VAN SPANNING BIJ HOGE FREQUENTIES OP UITGANG 1 ?

Hiernaast is een verzwakkerschakeling getekend waaraan U gemeten heeft. Bij de eerste meting werd de oscilloscoop op uitgang 1 aangesloten. De ingangsweerstand van deze oscilloscoop bedraagt 1 MΩ. De ingangscapaciteit is ongeveer 30 pF; deze staat parallel aan de R_i van de oscilloscoop.



Hier ziet U opnieuw de verzwakkerschakeling, nu echter belast met de oscilloscoop op uitgang 1. R_2 en R_3 zijn gemakshalve vervangen door een weerstand R_v = 11,1 kΩ. R_i en C_i staan parallel aan R_v. De ingangsweerstand van 1 MΩ parallel aan 11,1 kΩ is te verwaarlozen. De ingangscapaciteit van 30 pF speelt bij hoge frequenties echter wel een rol van betekenis. De impedantie van C_i wordt zo laag dat tussen de punten 3 en 2 de impedantie veel lager wordt dan 11,1 kΩ. Hierdoor daalt de uitgangsspanning u_u.



In nevenstaande tabel is de impedantie van C_i vermeld bij een aantal frequenties. Bij een frequentie van 100 Hz is de impedantie ongeveer 50 MΩ; bij 1 MHz is X_C slechts 5 kΩ.

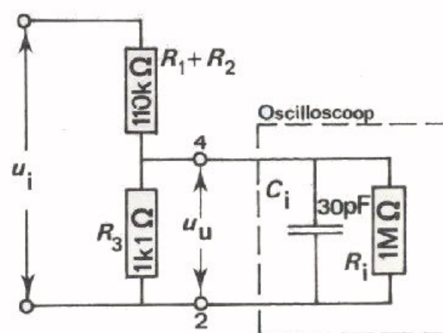
Frequentie	$X_C = \frac{1}{\omega C_i}$
100 Hz	50 MΩ
1 kHz	5 MΩ
10 kHz	500 kΩ
100 kHz	50 kΩ
1 MHz	5 kΩ

Hieruit blijkt dus dat bij de meting op uitgang 1 de afwijking van de verzwakking wordt veroorzaakt door de *ingangscapaciteit* van de oscilloscoop.

WAAROM BLIJFT OP UITGANG 2 DE VERZWAKKING BIJ HOGERE FREQUENTIES NAGENOEG CONSTANT ?

Bij de meting is gebleken dat de verzwakking bij hoge frequenties op uitgang 2 veel minder verandert dan op uitgang 1 (vergelijk de grafieken op pagina 3). Op het vorige blad hebben we gezien waarom de verzwakking op uitgang 1 nogal frequentie-afhankelijk is. We gaan nu onderzoeken waarom de verzwakking op uitgang 2 nagenoeg constant blijft bij hogere frequenties.

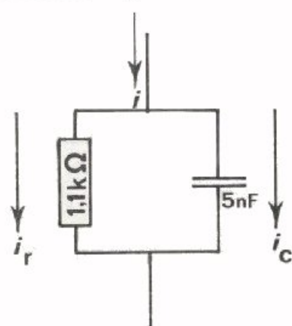
Hiernaast is nogmaals de verzwakker getekend, nu in stand 2, belast met de oscilloscoop.
In plaats van R_1 en R_2 is één weerstand van 110 kΩ getekend. De ingang van de oscilloscoop staat hier parallel aan R_3 = 1,1 kΩ.

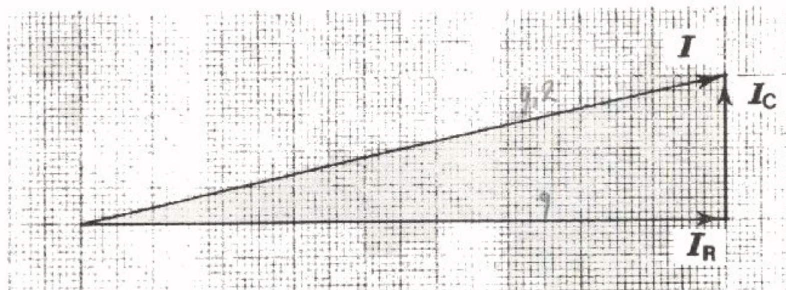


De invloed van de R_i van de oscilloscoop parallel aan 1,1 kΩ kunnen we al meteen verwaarlozen. De invloed van C_i gaan we nog eens nader bekijken. Uit de tabel van de vorige pagina weten we dat bij een frequentie van 1 MHz de reactantie van C_i 5 kΩ bedraagt. Deze capacitieve belasting staat parallel aan de ohmse weerstand van 1,1 kΩ. Uit onderstaande oefening zal blijken dat de invloed van X_C = 5 kΩ parallel aan R = 1,1 kΩ te verwaarlozen is. Dit betekent dat ook bij 1 MHz de verzwakking in stand 2 ongeveer gelijk is aan de verzwakking bij lage frequenties.

OEFENING

Van de volgende parallelschakeling is op schaal het vectordiagram van de stromen getekend.





Bepaal m.b.v. een maatlat hoeveel % i groter is dan i_r.

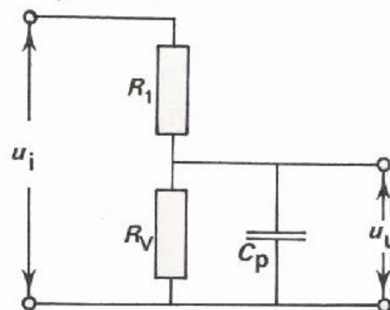
i is slechts [%] groter dan i_r.

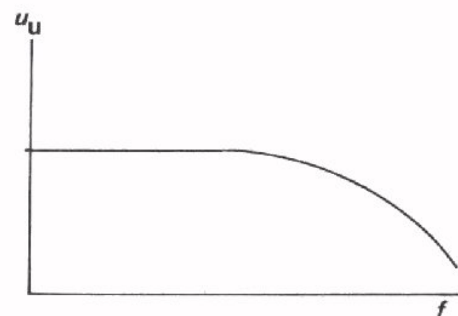
Conclusie: i is nagenoeg gelijk aan i_r. Hieruit volgt dat de impedantie van de parallelschakeling praktisch gelijk is aan R = 1,1 kΩ.

We vatten het voorgaande nog eens even samen in het kort.

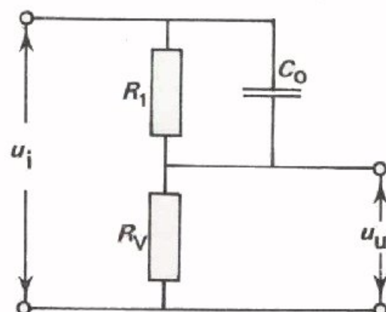
We hebben door metingen de volgende feiten geconstateerd:

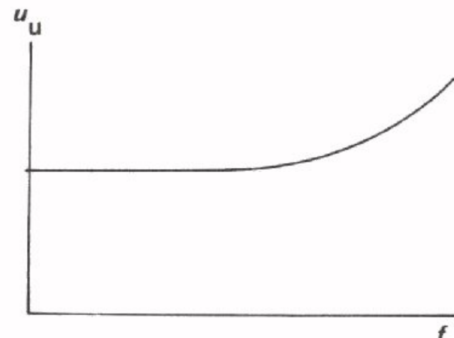
1. De uitgangsspanning van een weerstandsverzwakker neemt bij hogere frequenties af ten gevolge van een capaciteit over de uitgang van de verzwakker. Deze capaciteit wordt gevormd door de ingangscapaciteit van de schakeling waarmee de verzwakker wordt belast. Ook de capaciteit van de *verbindingen* aan de uitgang van de verzwakker zijn hierbij inbegrepen.
2. De afname van de uitgangsspanning ten gevolge van deze parasitaire capaciteiten is groter naarmate de uitgangsweerstand van de verzwakker hoger is.



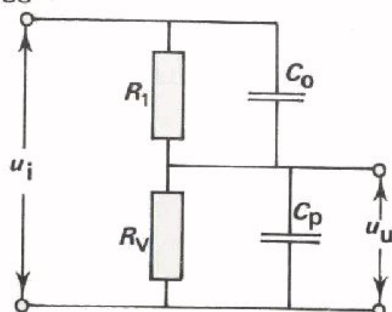


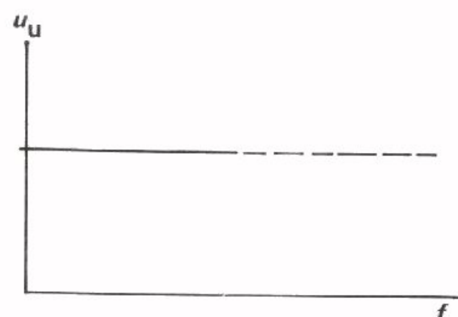
Dit effect kunnen we in de andere richting laten verlopen door een capaciteit parallel aan de "boven"-weerstand te schakelen (zie volgende figuur). Immers ten gevolge van C_o zal de impedantie van het bovenste gedeelte van de verzwakker kleiner worden bij toenemende frequentie. Hierdoor neemt de uitgangsspanning *toe*.





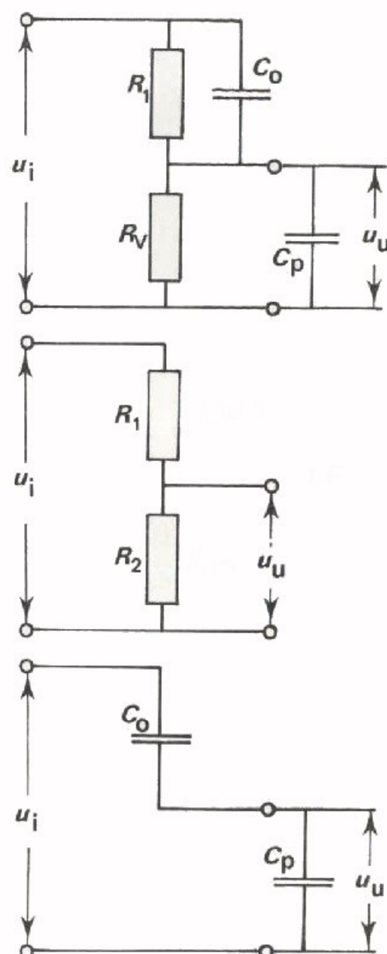
Een combinatie van de twee bovenstaande schakelingen kan een frequentie-*on*afhankelijke verzwakker opleveren. Men moet dan voor C_o de juiste waarde kiezen. Welke waarde dit is zullen we op het volgende blad uitleggen.





BEREKENING VAN C_o

We hebben beweerd dat met behulp van een extra capaciteit C_o de verzwakking van een weerstandsverzwakker frequentie-onafhankelijk kan worden gemaakt.



Hoe groot moet C_o zijn om dit te bereiken ? Hiernaast ziet u nogmaals het verzwakkerschema. R_l en R_v zijn de verzwakkerweerstanden. C_p is de som van de parasitaire capaciteiten die over de uitgang staan. C_o is de capaciteit die is toegevoegd om de verzwakking bij hoge frequenties gelijk te maken met die bij lage frequenties.

Bij *lage* frequenties kan men de capaciteiten verwaarlozen. De verzwakking wordt dan bepaald door de waarde van de weerstanden. Bij lage frequenties is de verzwakking:

$$V_u(\text{laag}) = \frac{R_v}{R_l + R_v}$$

Bij *hoge* frequenties zijn de impedanties van C_o en C_p zo laag, dat de weerstanden geen rol meer spelen. De verzwakker ziet er dan uit zoals hiernaast getekend. De verzwakking bij hoge frequenties is dus gelijk aan:

$$V_u(\text{hoog}) = \frac{X_{Cp}}{X_{Co} + X_{Cp}}$$

Na enig rekenwerk volgt, dat $V_u(\text{hoog}) = \dfrac{C_o}{C_o + C_p}$

De verzwakking bij hoge frequenties is gelijk aan die bij lage frequenties als:

$$\frac{R_v}{R_l + R_v} = \frac{C_o}{C_o + C_p}$$

Kruislings vermenigvuldigen levert op : $R_lC_o + R_vC_o = R_vC_p + R_vC_o$.

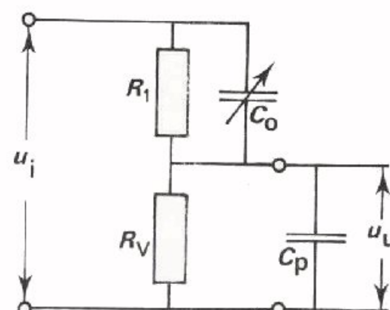
Hieruit volgt dat C_o een waarde moet hebben van:

$$\boxed{C_o = \frac{R_v}{R_l}\, C_p}$$

In ons voorbeeld is $R_v = 11{,}1\ \text{k}\Omega$ en $R_l = 100\ \text{k}\Omega$. Nemen we verder aan dat $C_p = 30\ \text{pF}$, dan volgt voor C_o:

$C_o \simeq$ [pF]

HET INSTELLEN VAN C_o



We hebben op de vorige pagina afgeleid dat de waarde van de correctiecondensator C_o gelijk moet zijn aan:

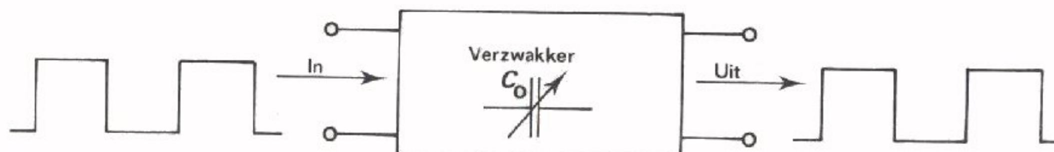
$$C_o = \frac{R_v}{R_1} C_p.$$

Zoals we weten bestaat C_p uit de parasitaire capaciteiten van de schakeling die na de verzwakker volgt. C_p is dus geen constante, maar is afhankelijk van de signaal-verwerker die op de uitgang van de verzwakker wordt aangesloten. Voor de condensator C_o kan men dus ook geen vaste waarde nemen. Voor C_o wordt in de praktijk dan ook meestal een instelbare condensator gebruikt (zie figuur).

Het op de juiste waarde instellen van C_o kan op de volgende manieren gebeuren:

1e manier.
Men bepaalt eerst de verzwakking bij een lage frequentie (b.v. bij 1 kHz). Daarna meet men de verzwakking bij een hoge frequentie (b.v. bij 1 MHz). Men regelt daarbij C_o zodanig, dat de verzwakking bij 1 MHz gelijk wordt aan die bij 1 kHz.
De verzwakker is dan juist afgeregeld. Deze manier van werken is nogal omslachtig (2 x meten). Bovendien weet men niet zeker of de verzwakking bij de tussenliggende frequenties ook goed is. Daarom past men in de praktijk meestal de volgende methode toe.

2e manier.
Op de ingang van de verzwakker sluit men een kanteelspanning aan. Men bekijkt de uitgangsspanning met behulp van een oscilloscoop. Is de vorm van de uitgangsspanning gelijk aan die van de ingangsspanning, dan is C_o op de juiste waarde afgeregeld. Wijkt de vorm van de uitgangsspanning af van die van de ingangsspanning dan moet men C_o bijregelen tot de uitgangsspanning kanteelvormig wordt.

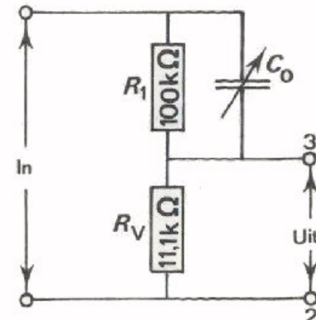


OPMERKING De frequentie van de kanteelspanning kiest men 10 à 12 maal *lager* dan de hoogste frequentie waarbij de verzwakker nog goed moet werken. Op de theoretische achtergronden van deze afregelprocedure gaan we hier niet verder in. Wél gaan we deze afregeling zelf uitvoeren.

OPDRACHT: HET AFREGELEN VAN DE VERZWAKKER

De verzwakker is dezelfde als bij de vorige meting. Bij de vorige meting hebben we geconstateerd dat de verzwakking op uitgang 1 nogal frequentie-afhankelijk is (zie C10.2). Dit zullen we in deze opdracht gaan corrigeren met behulp van condensator C_o.

- Monteer de regelbare condensator C_o op Uw paneel tussen de punten 1 en 3 van blok 4 (zie pag.2). C_o is dan parallel aan R_1 geschakeld.



- Sluit een blokspanning aan op de ingang van de verzwakker; U_{tt} = 1 V; frequentie 100 kHz.
- Meet de spanning op uitgang 1 met behulp van een oscilloscoop.
- Stel C_o zodanig in dat de vorm van de uitgangsspanning gelijk is aan die van de ingangsspanning.
- Voer nu in plaats van de blokspanning een sinusvormige ingangsspanning U_{tt} = 1 V toe.
- Meet achtereenvolgens de verzwakking bij 10^2, 10^3, 10^4, 10^5 en 10^6 Hz. Noteer de meetresultaten in de volgende tabel.

Frequentie (Hz)	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
Verzwakking (V_u)					

CONCLUSIE

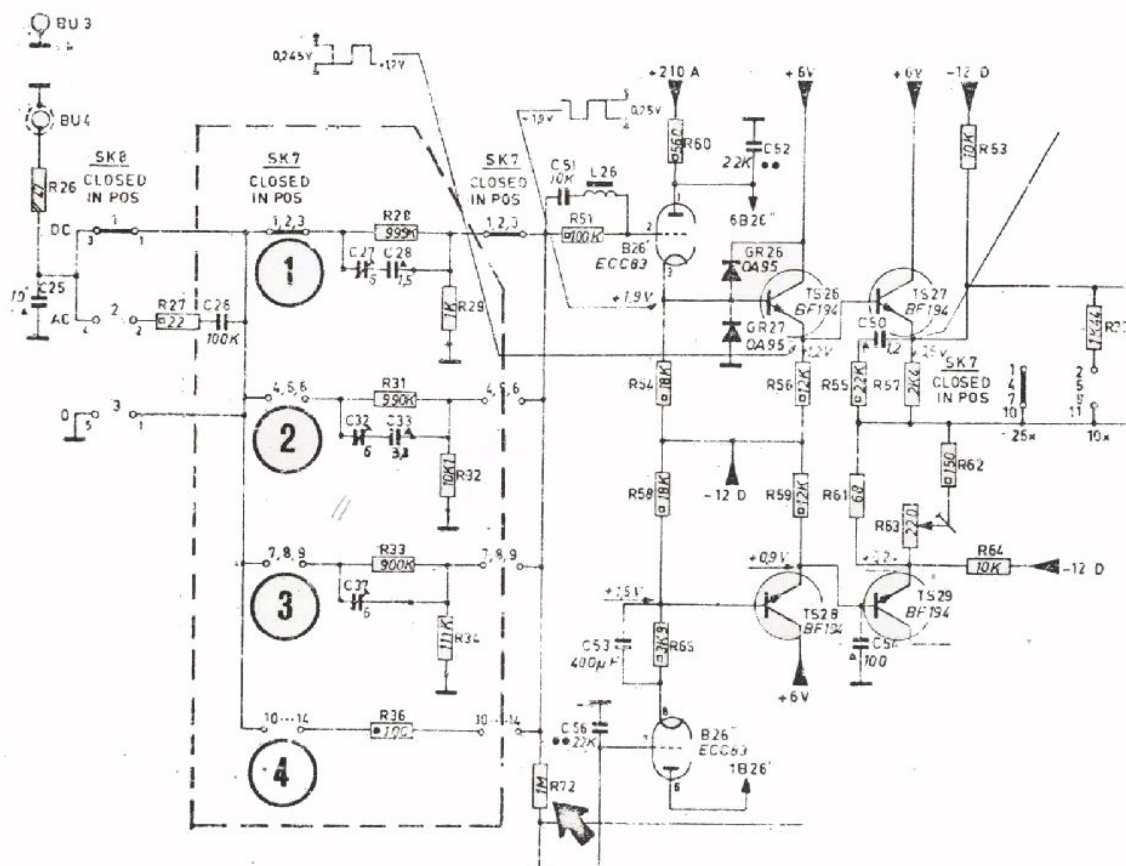
De verzwakking is voor alle spanningen tot 1 MHz **wel/niet** gelijk.

OPMERKING

Uit het voorgaande kunt U wel begrijpen dat deze afregeling alleen geldt voor de aangesloten oscilloscoop. Vervangt U deze oscilloscoop door een ander meetinstrument, dan moet C_o waarschijnlijk opnieuw afgeregeld worden.

Geef een verklaring.

EEN PRAKTISCH SCHEMA VAN EEN GECORRIGEERDE WEERSTANDSVERZWAKKER



Op dit schema ziet U de ingangsschakeling van het Y-kanaal van een oscilloscoop. In deze schakeling is een deel van de Y-verzwakker omrand door een stippellijn. Dit deel bestaat uit 4 verzwakkerstanden. Met behulp van regelbare condensators is de verzwakking frequentie-onafhankelijk gemaakt.

Ga voor iedere stand na hoe groot de verzwakking is. Let wel op dat R_{72} parallel staat met R_{29} of R_{32} of R_{34}.

De verzwakking in stand 1 is

De verzwakking in stand 2 is

De verzwakking in stand 3 is

De verzwakking in stand 4 is

DE VERZWAKKERMEETKOP VAN UW OSCILLOSCOOP

Tot de uitrusting van een oscilloscoop behoort een verzwakkermeetkop.

De verzwakking van de meetkop van Uw oscilloscoop is: V_u = [ ]

Bij gebruik van de verzwakkermeetkop moet men dus de meetwaarde (volgens het opschrift op de tekstplaat) met het getal [ ] vermenigvuldigen.

Deze meetkop wordt in de volgende gevallen gebruikt:

a. Als een hoge spanning moet worden gemeten. Bij te hoge spanningen op de Y-ingang van een oscilloscoop valt een deel van het beeld buiten het scherm.

   Hoeveel wisselspanning kan men maximaal aan het Y-kanaal van Uw oscilloscoop leggen voordat het beeld buiten het scherm valt ?

   U_{yt} = [V]

b. Als een zeer hoge ingangsweerstand nodig is. De ingangsweerstand van verzwakkermeetkop + oscilloscoop is aanzienlijk hoger dan de ingangsweerstand van de oscilloscoop alleen.

   De ingangsweerstand van de door U gebruikte oscilloscoop is:

   R_i(zonder meetkop) = [MΩ]

   R_i(met meetkop) = [MΩ]

c. Als een lage ingangscapaciteit nodig is. De ingangscapaciteit van verzwakkermeetkop + oscilloscoop is aanmerkelijk lager dan de ingangscapaciteit van de oscilloscoop alleen.

   De ingangscapaciteit van Uw oscilloscoop is:

   C_i(zonder meetkop) = [pF]

   C_i(mét meetkop) = [pF]

OEFENING

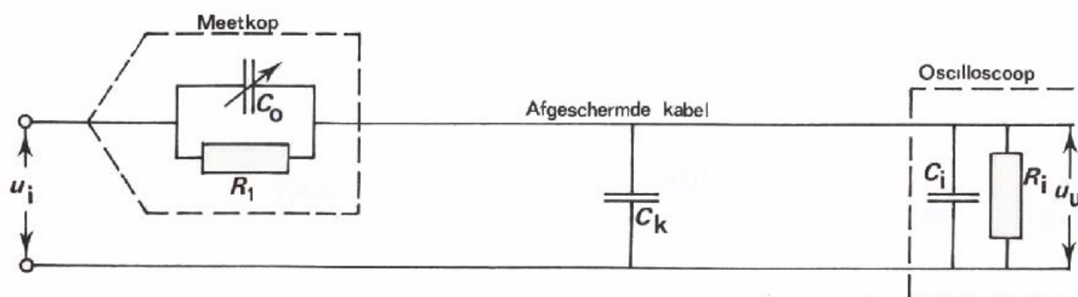
Men meet een sinusvormige spanning m.b.v. een oscilloscoop + verzwakkermeetkop (20 : 1). De beeldhoogte is 8 cm. De Y-verzwakker is ingesteld op 2 V/cm.

Hoe groot is de *effectieve* waarde van de wisselspanning ?

$U_{eff} \approx$ [V]

HOE IS EEN VERZWAKKERMEETKOP SAMENGESTELD ?

Hieronder is het principeschema van een verzwakkermeetkop getekend, terwijl deze is aangesloten op de ingang van een oscilloscoop.



In de meetkop is het ene gedeelte van de verzwakker (R_1) en de correctiecondensator C_o gemonteerd. De ingangsweerstand (R_i) en de ingangscapaciteit (C_i) van de oscilloscoop vormen samen de eigencapaciteit van de verbindingskabel C_k, het andere gedeelte van de verzwakker C_k staat parallel aan C_i. Zij vormen samen de parasitaire capaciteit over de uitgang van de verzwakker. Door regeling van C_o kan men de verzwakking frequentie-onafhankelijk maken. Op het volgend blad gaan we dit uitvoeren.

OEFENING

In bovenstaand schema is R_1 = 9 MΩ, R_i = 1 MΩ, C_i = 30 pF, C_k = 42 pF.

Hoe groot is de totale parasitaire capaciteit over R_i? C_v = [pF]

Hoe groot moet C_o worden opdat de verzwakking bij alle frequenties dezelfde is ? C_o = [pF]

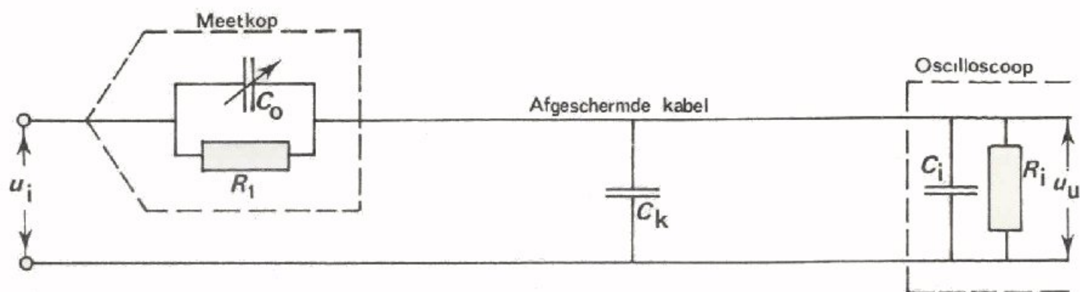
De verzwakking is: V_u = [ ]

De ingangsweerstand van meetkop + oscilloscoop is $R_1 + R_i$ = [MΩ]

De ingangscapaciteit van meetkop + oscilloscoop is:

C_o in serie met ($C_k + C_i$) = [pF]

HET AFREGELEN VAN DE VERZWAKKERMEETKOP VAN EEN OSCILLOSCOOP



Hierboven is nogmaals het inwendige van een verzwakkermeetkop en het ingangscircuit van een oscilloscoop getekend. Met C_o gaan we de verzwakking bij hoge frequenties gelijk maken aan die bij lage frequenties. De meetkop is zodanig samengesteld, dat men C_o van buitenaf kan regelen en daarna kan vastzetten. Hoe dit bij de verzwakkermeetkop van Uw oscilloscoop gebeurt zal de leraar U vertellen.

Het afregelen van C_o doen we als volgt:

- Sluit de verzwakkermeetkop via de meetkabel aan op de Y-ingang van de oscilloscoop.
- Voer via de meetkop een kanteelvormige spanning toe. Zo'n spanning wordt in de oscilloscoop zelf opgewekt. De leraar zal U vertellen hoe deze spanning kan worden afgenomen.
- Op het scherm van de oscilloscoop verschijnt één van onderstaande spanningsvormen.

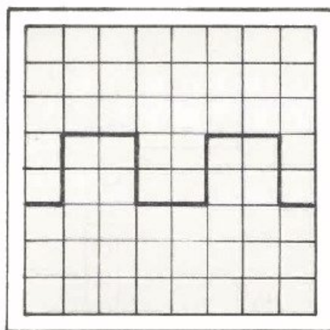


Fig.a: C_o goed.

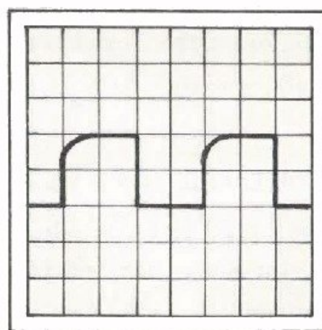


Fig.b: C_o te groot

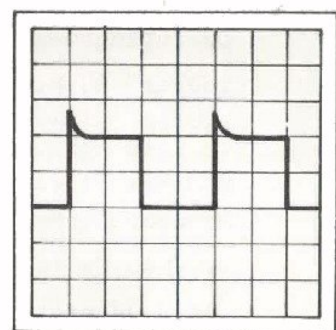


Fig.c: C_o te klein.

Is de spanning zuiver blokvormig (figuur a), dan is C_o goed ingesteld Verloopt de spanning zoals weergegeven in de figuren b of c, dan moet C_o bijgeregeld worden.

- Zet C_o vast.
- De verzwakkermeetkop is nu klaar voor gebruik.

EEN ACTIEVE VERZWAKKER

In het voorgaande hebben we ervaren dat bij weerstandsverzwakkers de verzwakking bij hoge frequenties gaat afwijken t.g.v. parasitaire capaciteiten (zie blad 3). We hebben ook gezien dat de invloed van parasitaire capaciteiten kleiner is naarmate de daaraan parallel geschakelde weerstand kleiner is (zie blad 5). Men zou hieruit de conclusie kunnen trekken, dat alle verzwakkers maar met laagohmige weerstanden moeten worden uitgevoerd. Dat dit niet altijd opgaat zal uit het volgende blijken.

Hieronder (fig.a) is nogmaals de verzwakker afgebeeld waarvan we weten dat de verzwakking bij hoge frequenties gaat afwijken. In fig.b is eenzelfde verzwakker (1:10) getekend waarvan de weerstanden een factor 10 lager zijn. De frequentie-afhankelijkheid is nu veel kleiner. De ingangsweerstand is echter ook 100x kleiner geworden. Dit laatste is bijv. voor ingangsverzwakkers niet gewenst.

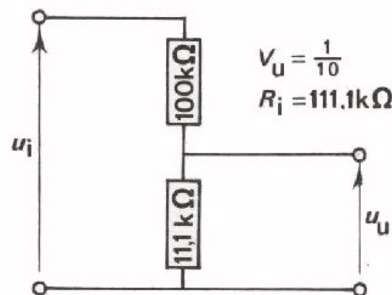


Fig. a

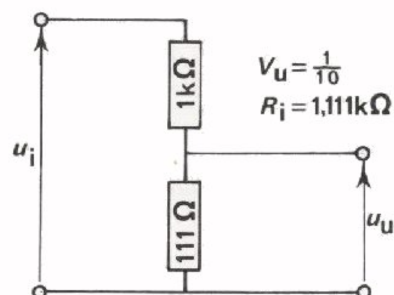
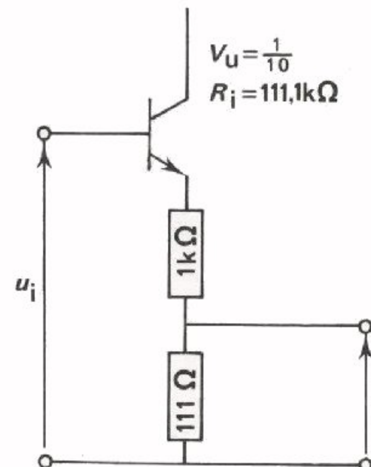


Fig. b

Met weerstanden alléén kan men geen *laagohmige* verzwakker met een *hoogohmige* ingangsweerstand maken. Door toevoeging van een *actieve* component (bijv. een transistor) kan dit wel worden verwezenlijkt. Hiernaast is zo'n *actieve* verzwakkker afgebeeld.

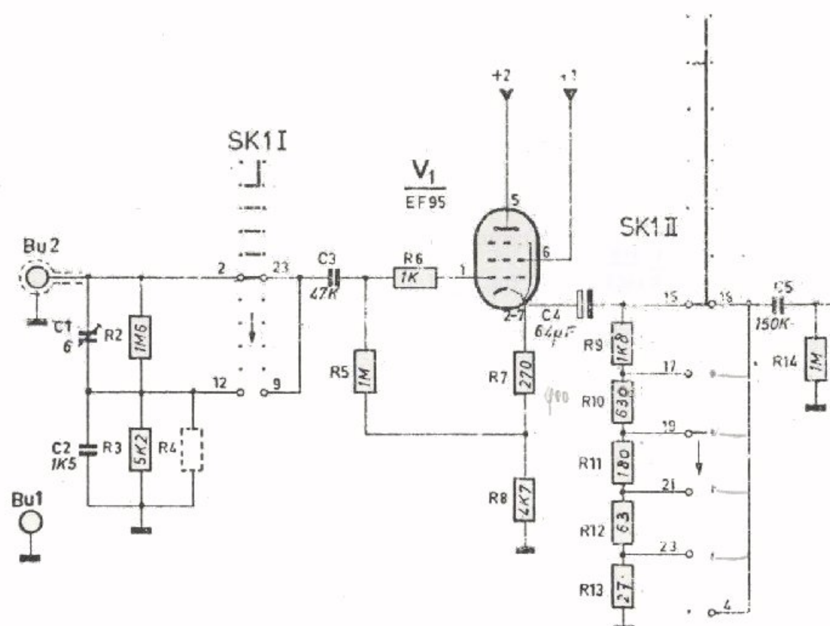
De ingangsweerstand van deze "emittervolger" is bij benadering $h_{fe} \times R_e$. Bij een $h_{fe} = 100$ is de R_i van de verzwakker dus ca. 111,1 kΩ (vergelijk met fig.a). De weerstanden zijn laagohmig (verg. met fig.b). Er is hier dus geen correctie met condensators nodig. De transistor versterkt 1x. De verzwakking van de schakeling is dus: $V_u = \frac{1}{10}$.



OPMERKING

Deze actieve verzwakker is niet alleen bijzonder geschikt voor ingangsverzwakker vanwege zijn *hoge ingangsweerstand*; de verzwakker wordt ook vaak als uitgangsverzwakker toegepast vanwege zijn *lage uitgangsweerstand*.

EEN VOORBEELD VAN EEN PRAKTISCHE ACTIEVE VERZWAKKER



Hier is het ingangscircuit van een elektronische schakeling afgebeeld. De weerstanden R_2 en R_3 vormen een hoogohmige frequentie-gecorrigeerde verzwakker. De weerstanden R_9 t/m R_{13} vormen samen met V_1 een actieve verzwakker.

Bereken de verzwakking van deze actieve verzwakker.

Op punt 17: V_u = ☐

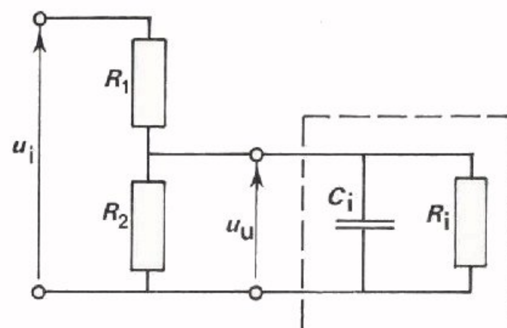
Op punt 19: V_u = ☐

Op punt 21: V_u = ☐

Op punt 23: V_u = ☐

SAMENVATTING:

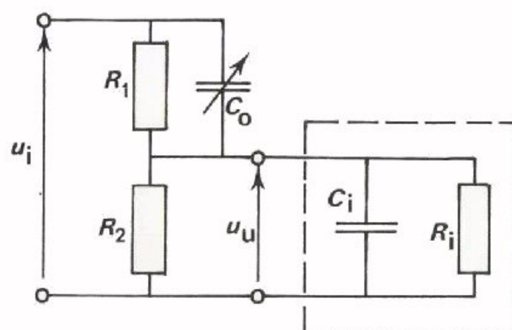
- Een hoogohmige weerstandsverzwakker gaat bij hogere frequenties afwijken ten gevolge van de ingangscapaciteit van de schakeling die op de uitgang van de verzwakker is geplaatst. Ten gevolge van C_i neemt de verzwakking $\frac{u_u}{u_i}$ bij hogere frequenties toe.



- Deze afwijking kan men corrigeren door middel van een capaciteit (C_o) die parallel aan R_1 is geschakeld. Men kan C_o zodanig instellen dat $\frac{u_u}{u_i}$ onafhankelijk van de frequentie wordt. De juiste waarde van C_o kan men berekenen uit:

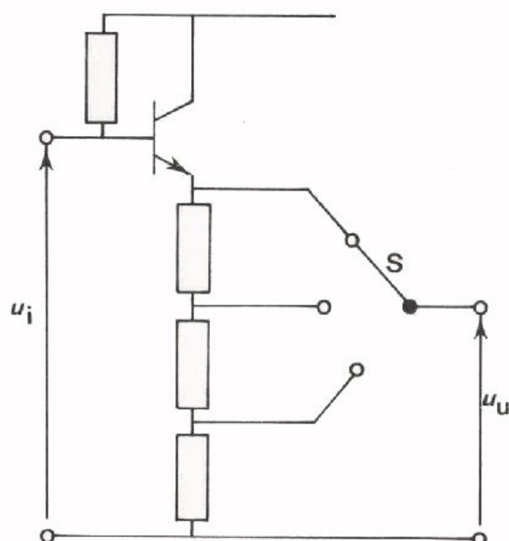
$$C_o = \frac{R_v}{R_1} \cdot C_i$$

R_v is de vervangingsweerstand van R_2 parallel aan R_i.



- De correctiecapaciteit C_o kan men afregelen met behulp van een kanteelspanning. Men sluit een kanteelspanning op de ingang van de verzwakker aan. Daarna regelt men aan C_o totdat de uitgangsspanning ook kanteelvormig wordt. De verzwakkermeetkop van een oscilloscoop wordt op deze wijze afgeregeld.

- Actieve verzwakkers zijn verzwakkers waarin actieve componenten (bijv. elektronenbuizen of transistors) worden toegepast. Met behulp van een emittervolger kan een verzwakker met een hoge ingangsweerstand en een lage uitgangsweerstand worden samengesteld. Frequentie-correctie is bij dit soort verzwakkers meestal niet nodig.

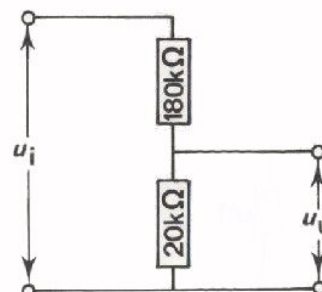


NAAM: [ ]   KLAS: [ ]

OEFENINGEN:

1. Bereken van deze schakeling de verzwakking

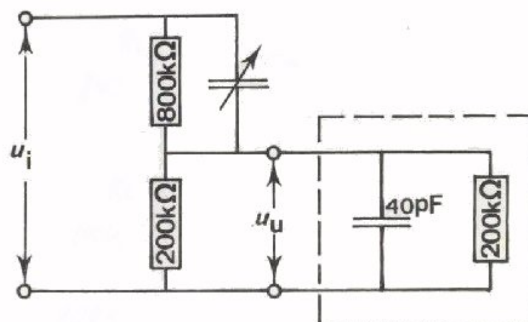
   V_u = [ ]

   Als men de verzwakker belast met een schakeling waarvan de ingangsweerstand 2 MΩ en de ingangscapaciteit 20 pF is, dan wordt bij hoge frequenties:

   - de verzwakking $\frac{u_u}{u_i}$ **groter/kleiner**
   - dit is het gevolg van C_i / R_i

2. In nevenstaande schakeling wordt C_o zodanig afgeregeld dat de verzwakking frequentie-onafhankelijk is.

   - Wat is de juiste waarde van C_o ?

     C_o = 40 pF O

     5 pF O

     320pF O

     200pF O

   - De verzwakking is V_u = [ ]

3. Via een verzwakkermeetkop 1 op 10 wordt een sinusvormige spanning gemeten m.b.v. een oscilloscoop. Op het scherm ontstaat een beeld waarvan de afstand tussen de positieve en negatieve top 6 cm is.

   De Y-verzwakker staat op 50 V/cm.

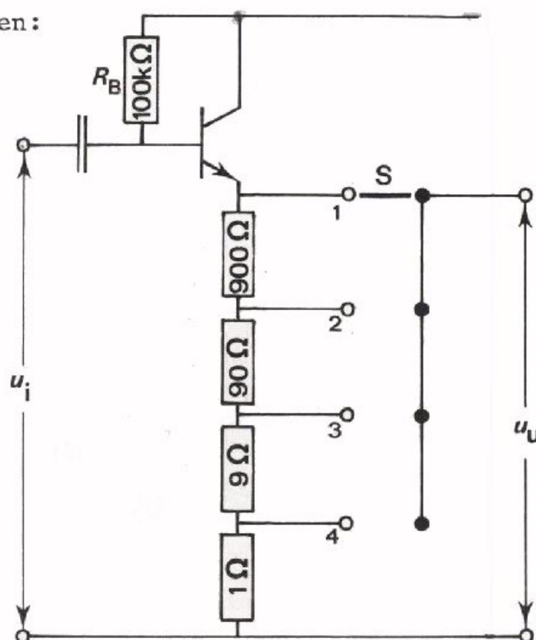
   - Hoe groot is de effectieve waarde van de ingangsspanning ?

     U_{eff} = [ ] V

4. Noem hieronder drie gevallen waarbij het gebruik van een verzwakkermeetkop gewenst is.

1.
2.
3.

5. Van deze actieve verzwakker is gegeven:



R_B = 100 kΩ

R_1 = 900 Ω

R_2 = 90 Ω

R_3 = 9Ω

R_4 = 1Ω

h_{fe}(transistor) = 100

S(transistor) = 200 mA/V

- Bepaal de ingangsweerstand van de verzwakker $R_i \simeq$ [kΩ]
- Bepaal de verzwakking $\frac{u_u}{u_i}$:

In stand 1 van de schakelaar S V_u = [ ]

In stand 2 van S V_u = [ ]

In stand 3 van S V_u = [ ]

In stand 4 van S V_u = [ ]

- Hoe groot is de uitgangsweerstand ?

In stand 1 van S R_u = [Ω]

In stand 4 van S R_u = [Ω]

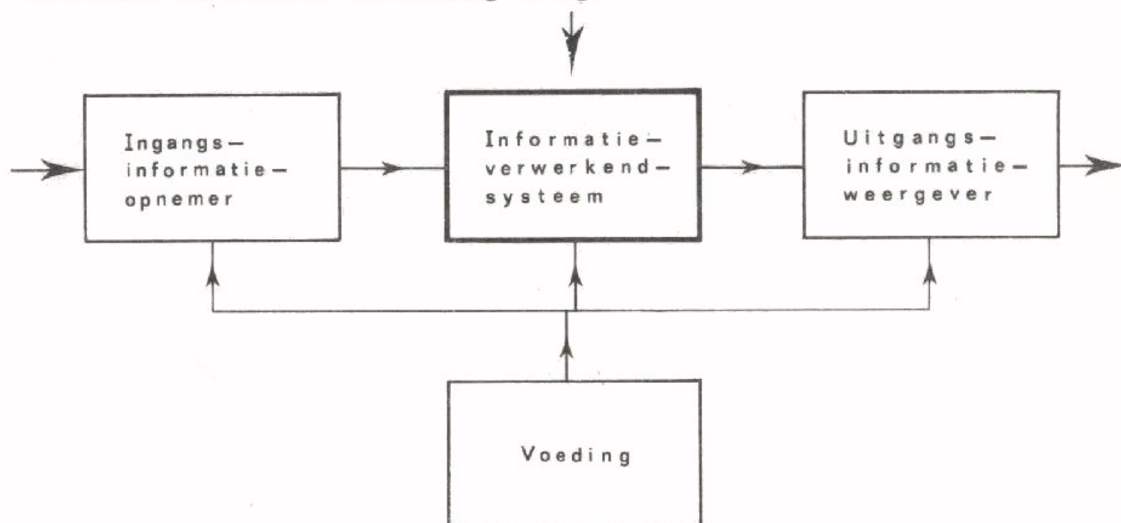
C 11

HERHALING I
DE THEORIE VAN C3 T/M C10

INLEIDING

In het dagelijks leven heeft men vaak te doen met informatie-verwerking (bijv. het wegen van massa's, het meten van temperaturen of het noteren van afspraken). Het verwerken van informatie gebeurt dikwijls met elektronische middelen. Elektronische informatie-verwerking heeft soms grote voordelen t.o.v. mechanische informatie-verwerking.

Voorbeeld van elektronische informatie-verwerking:
De informatie van een grammofoonplaat wordt met behulp van een pick-up element omgezet in een evenredig elektrisch signaal. Dit signaal wordt elektronisch versterkt. Tenslotte zet men met behulp van een luidspreker het versterkte signaal om in geluid. Het pick-up element noemt men de ingangs-informatie-*opnemer*; de versterker is de informatie-*verwerker*; de luidspreker is de informatie-*weergever*.
Deze hoofdbestanddelen vindt men bij nagenoeg alle gevallen van elektronische informatie-verwerking terug.



In de lessen C3 t/m C10 zijn twee groepen van schakelingen aan de orde geweest; nl. schakelingen met de functie *versterken* en schakelingen met de functie *verzwakken*. Deze schakelingen horen thuis bij het blok informatie-verwerkend-systeem. In deze les wordt de theorie uit deze lessen nog eens in het kort herhaald. De oefeningen die hierbij worden gevraagd, geven U de gelegenheid te ontdekken of Uw kennis van de behandelde stof voldoende is. Kunt u bepaalde vraagstukken niet - of met veel moeite - oplossen, sla er de desbetreffende lessen dan nog eens op na. U moet deze les beschouwen als een voorbereiding op de testles die hierna volgt.

HET FUNCTIE-BEGRIP IN DE ANALOGE TECHNIEK (zie C3)

- In het analoge deel van de lessen gaan we *niet* alle mogelijke schakelingen behandelen, dat zijn er veel te veel, sommige verouderen. nieuwe komen erbij.

- We gaan wél in de praktijk voorkomende verwerkingen of *functies* onder de loep nemen. Dit is een beperkt aantal en bovendien niet aan veroudering onderhevig. De functies blijven bestaan.

- Daarom verdelen we de schakelingen in *groepen*, waarbij alle schakelingen van een groep *eenzelfde functie* hebben.

De gangbare functies zijn:	De groepen van schakelingen zijn:
1. Versterken	1. Versterkerschakelingen
2. Verzwakken	2. Verzwakkerschakelingen
3. Oscilleren	3. Oscillatorschakelingen
4. Omvormen	4. Omvormschakelingen
5. Mengen	5. Mengschakelingen
6. Bewaren of opslaan	6. Geheugenschakelingen
7. Voeden	7. Voedingsschakelingen
8 . Transporteren	8. Transportschakelingen
9. Opnemen	9. Opneemschakelingen
10. Weergeven	10. Weergeefschakelingen

- Elke schakeling met een bepaalde functie is voor te stellen door een *blok* (een zogenaamd functie-blok) met een aantal aansluitklemmen.

Voorbeeld:



In- en uitgang hebben meestal een klem gemeenschappelijk

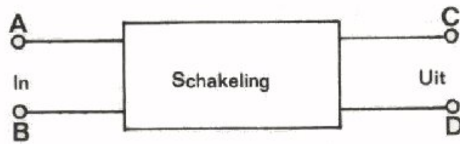


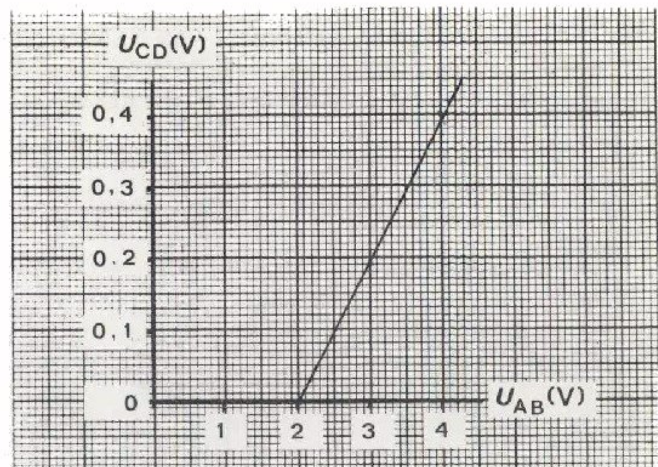
Vereenvoudigde voorstelling.
De pijlrichting komt overeen met de richting van de informatie-overdracht.

- Van een functie-blok behoeft de inhoud niet bekend te zijn. Wél de eigenschappen die tussen de aansluitklemmen zijn te meten. Deze vertellen hoe het blok zich gedraagt. Zij leggen de functie vast.

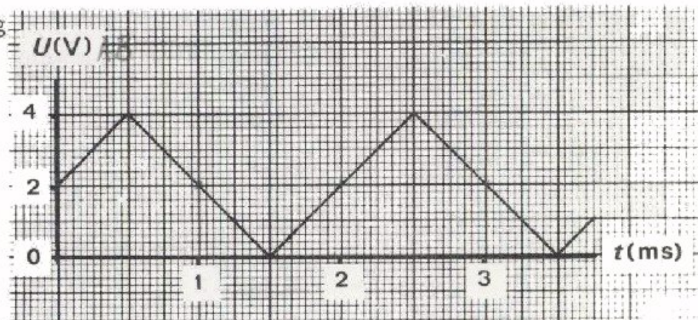
- Een elektronisch systeem stelt men vaak voor als een verzameling van blokken met onderlinge verbindingen. Dit is het *functie - blokschema*, waarmee handig te werken is als het hele systeem gecontroleerd of gerepareerd moet worden.

TEST UZELF

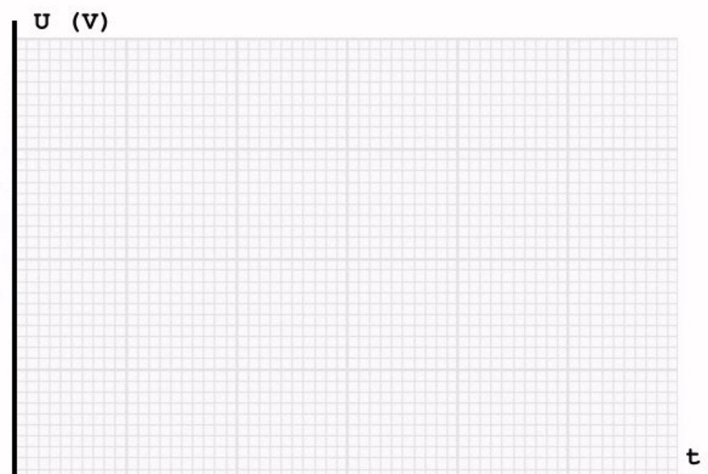




Van deze schakeling is het verband tussen in- en uitgangsspanning gegeven in nevenstaande grafiek.



Het verloop van de ingangsspanning u_{AB} is hiernaast afgebeeld.



Teken het verloop van de uitgangsspanning u_{CD}. Plaats de tijd- en spanningswaarden langs de assen.

De functie van de schakeling is:

- O versterken
- O verzwakken
- O oscilleren
- O omvormen
- O mengen
- O bewaren of opslaan
- O voeden
- O opnemen (niet-elektrisch) ⟶ elektrisch)
- O weergeven (elektrisch ⟶ niet-elektrisch)

DE UITWENDIGE EIGENSCHAPPEN VAN VERSTERKERS (zie C4)

- We zeggen dat een elektrisch signaal versterkt wordt als:
  - er vermogensversterking optreedt,
  - het uitgangssignaal dezelfde vorm heeft als het ingangssignaal.

- In de praktijk wordt de versterkeringang op een signaalbron aangesloten. De uitgang wordt verbonden met een belasting.



- In geval van *vermogens*versterking heeft men, behalve passieve componenten in ieder geval ook actieve componenten nodig.

- Het van een versterker af te nemen vermogen is altijd kleiner dan het vermogen dat de voeding eraan toevoert.

- De vermogensversterking wordt vaak uitgedrukt in bel (B) of in decibel(dB).

  A_p = 3 B wil zeggen: $A_p = 10^3 = 1000$.

  A_p = 40 dB wil zeggen: $A_p = \frac{40}{10} = 4$ B of $A_p = 10^4 = 10\ 000$

  A_p = 47 dB wil zeggen: A_p ligt tussen 10 000 en 100 000 in.

  A_p = 3 dB wil zeggen: $A_p = 2$

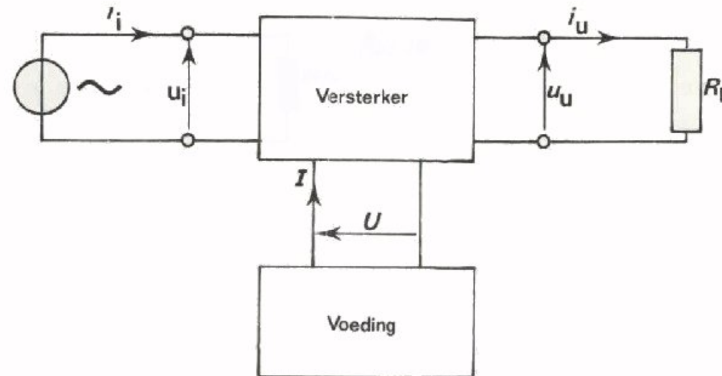
- Bij in serie-geschakelde versterkertrappen berekent men de totale vermogensversterking door:
  - de verhoudingsgetallen (P_u/P_i) van de afzonderlijke trappen met elkaar te *vermenigvuldigen*.
  - de dB's waarin P_u/P_i van de afzonderlijke trappen zijn uitgedrukt, *op te tellen*.

- De belangrijkste overdrachtseigenschappen van een versterker zijn:
  - de stroomversterking
  - de spanningsversterking
  - de vermogensversterking.

- De belangrijkste ingangseigenschappen zijn:
  - de ingangsweerstand
  - de maximaal toelaatbare ingangsstroom en spanning en het maximaal toelaatbare vermogen.

- De belangrijkste uitgangseigenschappen zijn:
  - de uitgangsweerstand
  - de maximaal mogelijke uitgangsstroom en spanning en het maximaal af te geven vermogen.

TEST UZELF



Welke van onderstaande beweringen zijn juist ?

- O $i_i \cdot u_i > i_u \cdot u_u$
- O $i_i \cdot u_i < i_u \cdot u_u$
- O $i_i \cdot u_i = i_u \cdot u_u$
- O $i_u \cdot u_u > U \cdot I$
- O $i_u \cdot u_u < (U \cdot I) + (i_i \cdot u_i)$
- O $i_u \cdot u_u = U \cdot I$

2. Van een versterker is het volgende gegeven:

Het maximaal toelaatbare ingangsvermogen $P_{i\ max} = 10$ mW.

De ingangsweerstand $R_i = 100\Omega$.

De spanningsversterking $A_u = 10$

De vermogensversterking $A_p = 20$ dB

Bereken:

De maximaal toelaatbare ingangsstroom (effectieve waarde)

$I_{i(max)}$ = [mA]

De maximaal toelaatbare ingangsspanning (effectieve waarde)

$U_{i(max)}$ = [V]

Het maximale uitgangsvermogen $P_{u(max)}$ = [W]

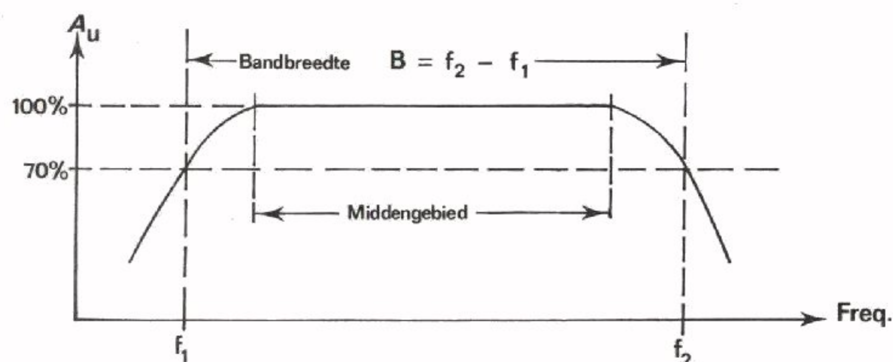
De stroomversterking A_i = [ ]

Het uitgangsvermogen bij een amplitude $U_{i(t)} = 400$ mV

P_u = [mW]

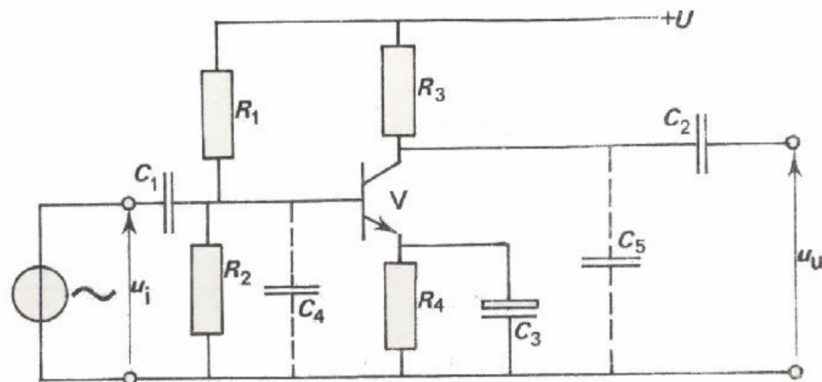
HET INWENDIGE VAN EEN VERSTERKER (zie C5)

- De eigenschappen aan de uitwendige klemmen van een versterker hangen af van de inwendige opbouw van de schakeling en de eigenschappen van de daarbij gebruikte componenten.
- De ingangseigenschappen van een versterker worden hoofdzakelijk bepaald door de eerste trap van die versterker.
- De uitgangseigenschappen van een versterker worden hoofdzakelijk bepaald door de laatste trap van die versterker.
- De overdrachtseigenschappen zijn afhankelijk van de totale opbouw van de versterker.
- De amplitude-frequentie-karakteristiek van een versterker is een grafiek die aangeeft hoe groot de wisselspanningsversterking A_u bij uiteenlopende frequenties is.



- De bandbreedte *B* van een versterker is het verschil tussen de frequenties f_1 en f_2 waarbij de *spannings*versterking gedaald is tot 70% van de A_u in het middengebied. Een andere definitie luidt:
  De bandbreedte van een versterker is het verschil tussen de frequenties f_1 en f_2 waarbij de *vermogens*versterking 3 dB gedaald is t.o.v. de A_p in het middengebied.
- Bij *lage* frequenties wordt het afnemen van de versterking veroorzaakt door koppel- en ontkoppelcondensators. Naarmate de capaciteitswaarden van de koppel- en ontkoppelcondensators groter zijn, zal de amplitude-frequentie-karakteristiek tot een lagere frequentie vlak blijven.
- Bij *hoge* frequenties is het afnemen van de versterking te wijten aan onvermijdelijke parasitaire capaciteiten. Door het gebruik van capaciteitsarme componenten en het toepassen van korte verbindingen tussen de componenten, zal de amplitude-frequentie-karakteristiek aan de hoge-frequentiekant verder doorlopen.

TEST UZELF



- Bovenstaande versterkertrap is een geaarde -schakeling.
- V is een **PNP/NPN** -transistor.
- De spanningsversterking van de schakeling wordt hoofdzakelijk bepaald door de steilheid van de transistor en de waarde van weerstand
- De bedoeling van koppelcondensator C_1 en C_2 is

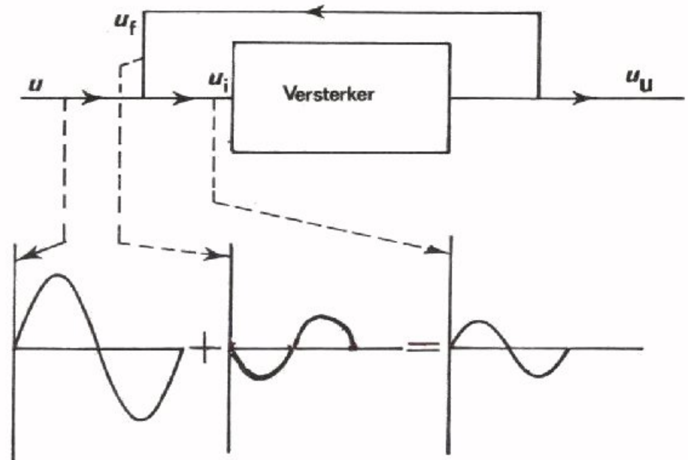
  Naarmate de frequentie van de ingangsspanning lager wordt valt er over C_1 en C_2 **meer/minder** wisselspanning, waardoor de versterking **toeneemt/afneemt**
- De weerstand R_4 dient voor
- De functie van de ontkoppelcondensator C_3 is

  Naarmate de frequentie van u_i lager is, is de reactantie van C_3 **groter/kleiner** waardoor de versterking **toeneemt/afneemt**
- De parasitaire capaciteiten C_4 en C_5 worden veroorzaakt door

  Naarmate de frequentie van u_i hoger wordt neemt de stroom door C_4 en C_5 **toe/af** Hierdoor neemt de uitgangsspanning **toe/af**

TEGENKOPPELING (zie C6)

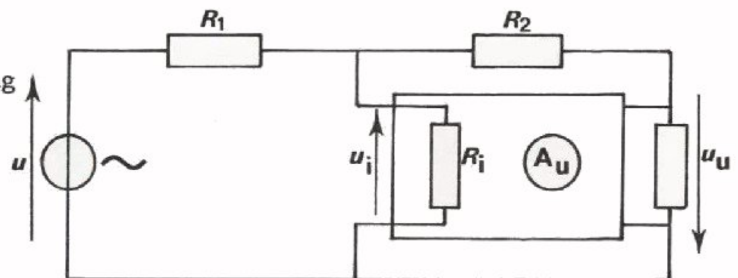
- Bij *terugkoppeling* van een versterker wordt een deel van het uitgangssignaal teruggevoerd naar de ingang.



- Als de fase van het teruggevoerde signaal zodanig is gericht dat het ingangssignaal van de versterker wordt *verkleind*, dan is er sprake van *tegenkoppeling*.

- De parallel-parallel-tegenkoppeling die hiernaast is afgebeeld wordt veelvuldig toegepast,

$$A_{uf} = \frac{U_{ut}}{U_t} \simeq \frac{R_2}{R_1}$$



- De *tegenkoppelfactor (F)* geeft aan hoeveel maal de versterking ten gevolge van de tegenkoppeling afneemt.

$$F = \frac{A_u}{A_{uf}} \quad \text{of } A_{uf} = \frac{A_u}{F}$$

- Diverse manieren van tegenkoppelen:
  a. Parallel-parallel-tegenkoppeling.
  b. Parallel-serie- tegenkoppeling.
  c. Serie-serie- tegenkoppeling.
  d. Serie-parallel- tegenkoppeling.

- *Voordelen* van tegenkoppeling zijn:
  - een meer constante gelijkstroominstelling (bij gelijkstroomtegenkoppeling)
  - een meer constante versterking.
  - vermindering van lineaire vervorming.
  - vermindering van niet-lineaire vervorming.
  - de mogelijkheid om de ingangs- en uitgangsweerstand te vergroten of te verkleinen.

  Bij parallel-parallel-tegenkoppeling: R_u kleiner; R_i kleiner.

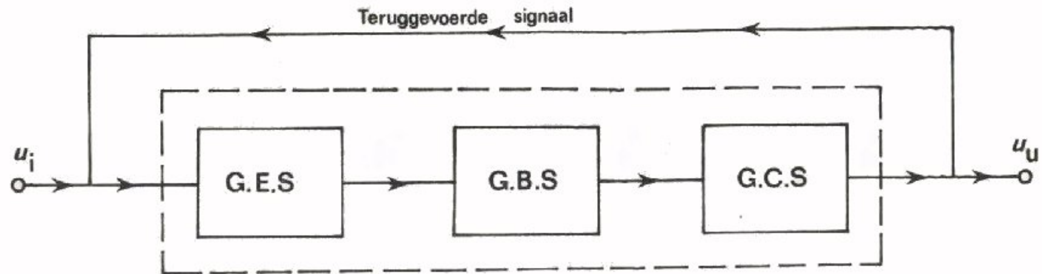
  Bij parallel-serie- tegenkoppeling: R_u kleiner; R_i groter.

  Bij serie-serie- tegenkoppeling: R_u groter ; R_i groter.

  Bij serie-parallel- tegenkoppeling: R_u groter ; R_i kleiner.

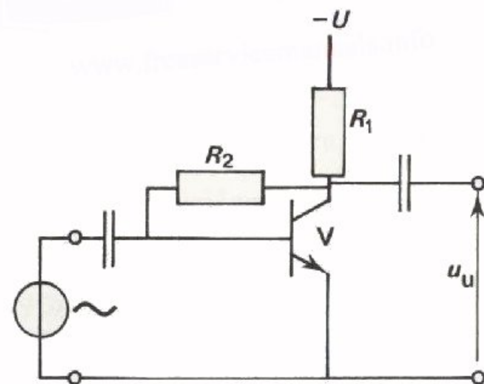
- Het *nadeel* van tegenkoppelen is dat de versterking vermindert.

TEST UZELF



1. Een versterker bestaat uit drie trappen. Na elkaar komen een "geaarde" emitter, een geaarde basis en een geaarde collectorschakeling.
   De uitgangsspanning u_u is dus in **fase/tegenfase** met de ingangsspanning u_i.
   Een deel van het uitgangssignaal wordt teruggevoerd naar de ingang.
   Hier is dus sprake van **meekoppeling/tegenkoppeling**

2. Nevenstaande schakeling is een tegengekoppelde versterkertrap.



   Tegenkoppeling komt tot stand via de weerstand [ ]

   De tegenkoppelfactor wordt groter naarmate R_2 **groter/kleiner** is.

   Bij deze schakeling hebben we te doen met:
   - O Parallel-parallel-tegenkoppeling.
   - O Parallel-serie- tegenkoppeling.
   - O Serie-serie- tegenkoppeling.
   - O Serie-parallel- tegenkoppeling.

   Ten gevolge van de tegenkoppeling is:
   - de ingangsweerstand van de schakeling **vergroot/verkleind**
   - de uitgangsweerstand van de schakeling **vergroot/verkleind**

DIVERSE SOORTEN VERSTERKER (zie C7)

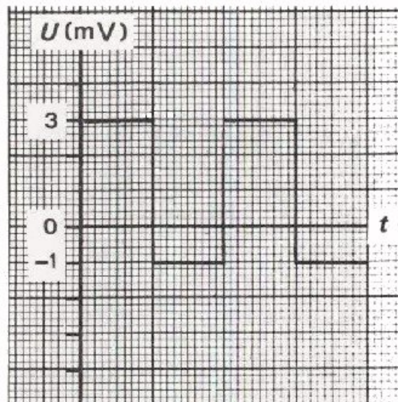
- Aan de hand van de amplitude-frequentie-karakteristiek van versterkers kan men volgende versterkertypen onderscheiden:
  - gelijkspanningsversterkers
  - wisselspanningsversterkers
  - chopperversterkers
  - bredeband-versterkers
  - selectieve versterkers
- Met behulp van gelijkspanningsversterkers kan men versterken:
  - gelijkspanning; geen bijzondere kleine spanningen.
  - wisselspanning; ook bij zeer lage frequenties.
  - gelijk- en wisselspanning tegelijk.
- Wisselspanningsversterkers kunnen uitsluitend wisselspanning versterken, echter niet wisselspanningen met zéér lage frequenties.
- Chopperversterkers zijn bijzonder geschikt voor het versterker van zéér kleine gelijkspanningen.
- Bij bredeband versterkers is de verhouding van de hoogste tot de laagste frequentie, waarbij verst erking optreedt bijzonder groot.
- Bij selectieve versterkers is de verhouding van de hoogste tot de laagste frequentie, waarbij een versterking optreedt, klein ($\simeq 1$).
- Zowel voor bredeband-versterkers als selectieve versterkers geldt bij benadering: $A_u \times B \simeq$ constant.
- Als met behulp van een gelijkspanningsversterker kleine gelijkspanningen moeten worden versterkt, kan men last hebben van gelijkspanningsdrift. "Gelijkspanningsdrift" is het verloop van de gelijkstroominstelling. Hierdoor verandert de uitgangsgelijkspanning terwijl de te versterken ingangsspanning constant blijft. Ingangsgelijkspanning drukt men uit in µV aan de ingang.

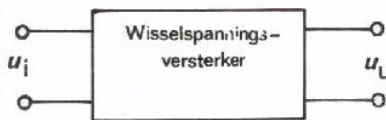
$$\text{Gelijkspanningsdrift} = \frac{\text{Verloop aan uitgang}}{\text{versterking}}$$

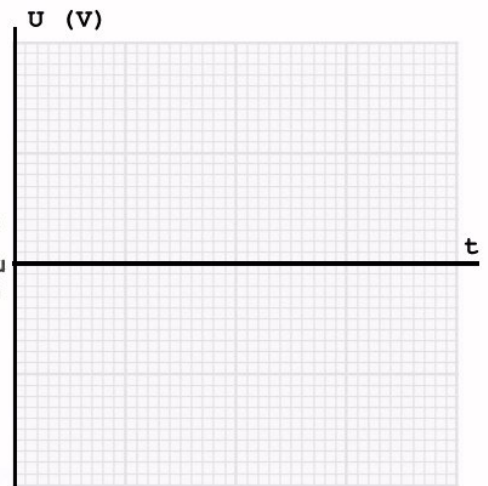
- Men kan aan de schakeling zien met welk soort versterker men heeft te doen:
  - Bij gelijkspanningsversterkers worden geen koppel- en ontkoppelcondensators toegepast.
  - In wisselspanningsversterkers worden de diverse trappen verbonden via condensators of transformators.
  - In chopperversterkers kan men een wisselspanningsversterker en omvormers onderscheiden.
  - Bij bredeband-versterkers past men capaciteits-arme onderdelen en verbindingen toe.
  - In selectieve versterkers gebruikt men banddoorlatende of bandonderdrukkende netwerken.

TEST UZELF

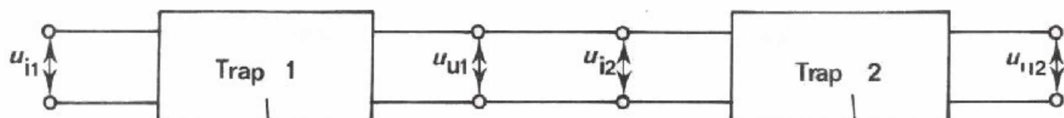
1. Aan de ingang van een *wissel*-spanningsversterker (A_u = 200) wordt de spanning u_i toegevoerd. Teken het verloop van de uitgangsspanning u_u. Zet bij de u_u- as de spanningswaarden.

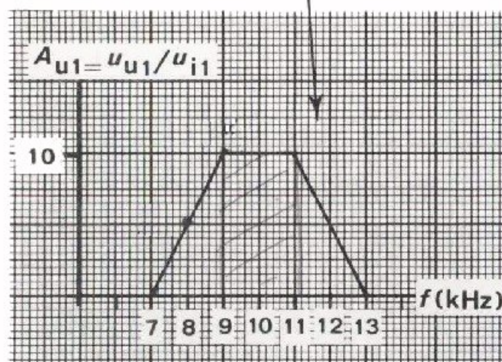


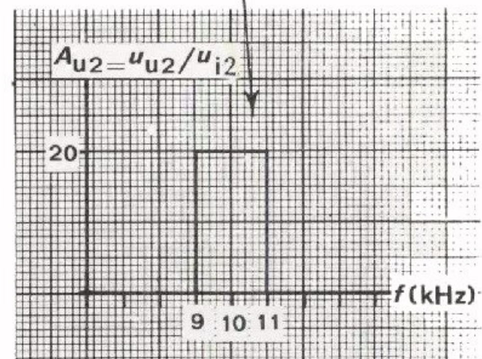




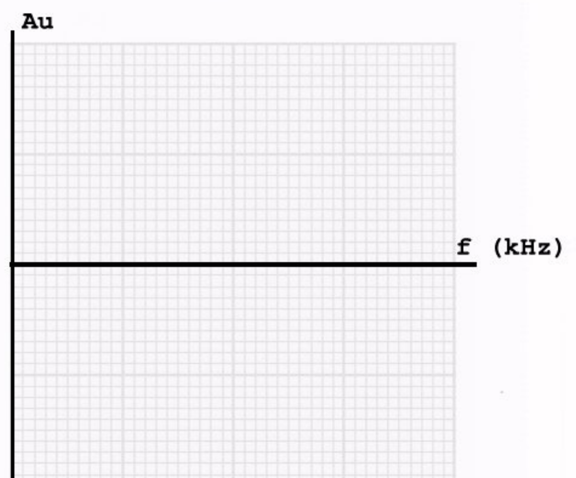
2. Een selectieve versterker bestaat uit twee trappen. Van elke trap is de amplitude frequentie-karakteristiek gegeven.







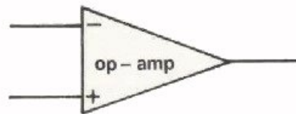
Teken hiernaast de amplitude-frequentie-karakteristiek van de trappen tezamen.

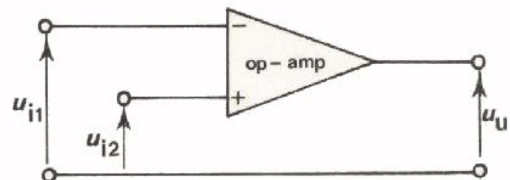


DE OPERATIONELE VERSTERKER (zie C6)

SAMENVATTING

- Een operationele versterker is een gelijkspanningsversterker met:
  - grote versterking
  - grote bandbreedte
  - hoge ingangsimpedantie
  - lage uitgangsimpedantie
  - weinig drift
  - twee ingangen.
- Afkorting operationele versterker: op-amp





- Een operationele versterker kan men voor verschillende functies gebruiken.
  Als versterker kan hij geschakeld worden als:
  - (fase)-omkerende versterker (inverting amplifier).
  - niet-omkerende versterker (non-inverting amplifier).
  - verschil-versterker (differential amplifier).
- De ingang van een op-amp bevat een symmetrische schakeling met twee ingangen. Deze schakeling noemt men een "long-tailed-pair".
- Een "long-tailed-pair" kan men gebruiken als niet-symmetrische versterker (fig.a) en als symmetrische versterker (fig.b).

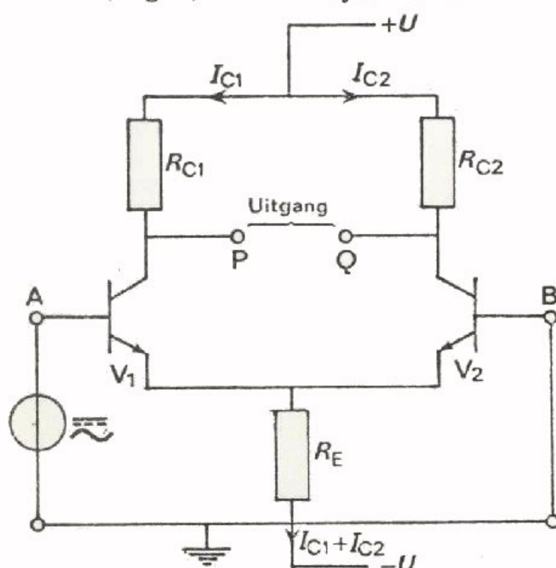


Fig. a

$$U_{PQ} = -S.R_C.\,U_{AB}$$

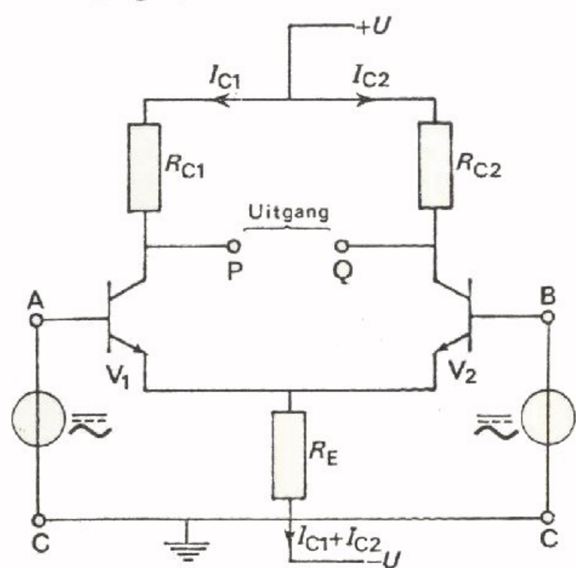


Fig. b

$$U_{PQ} = S.R_C(U_{BC} - U_{AC})$$

- De kwaliteit van een verschilversterker wordt weergegeven met de "common-mode-rejection". De CMR is de verhouding van gelijk gerichte en tegengesteld gerichte ingangssignalen die een even grote uitgangsspanning veroorzaken

- Een verschilversterker gebruikt men, als kleine spanningsverschillen moeten worden gemeten tussen punten die vrij van aarde liggen. Eventuele stoorsignalen die tegelijkertijd evengroot op beide genoemde punten aanwezig zijn, worden daarbij niet versterkt.

TEST UZELF

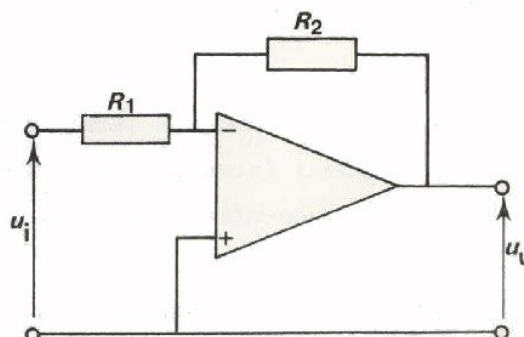
1. Van nevenstaande schakeling is

   R_1 = 1 kΩ, R_2 = 100 kΩ en

   $U_{i(t)}$ = 10 mV,

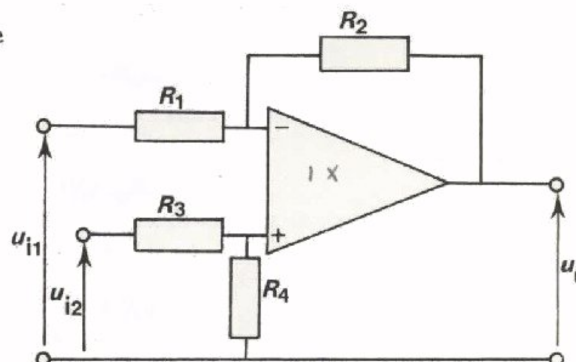
   $U_{u(t)}$ = [V]

   u_u is in [**fase/tegenfase**] met u_i.



2. In nevenstaande schakeling zijn alle weerstanden gelijk. Verder is

   $U_{i1(t)} = U_{i2(t)} = 1\frac{1}{2}$ V. u_{i1} is in tegenfase met u_{i2}. De uitgangsspanning U_{ut} = [V]



3. In deze schakeling is:

   U_i = 100 mV (gelijkspanning);

   $V_1 = V_2$; $R_{C1} = R_{C2}$ = 1,5 kΩ;

   R_E = 1 kΩ; U = 10 V t.o.v. aarde.

   Bij de gegeven ingangsspanning vloeit er door V_1 een collectorstroom van 6 mA en door V_2 een stroom van 3,5 mA. De spanning op punt P is dan

   [V] t.o.v. aarde. De

   spanning op punt Q is dan [V] t.o.v. aarde.

   De spanning tussen P en Q is [V]

   De spanningsversterking is [ ]

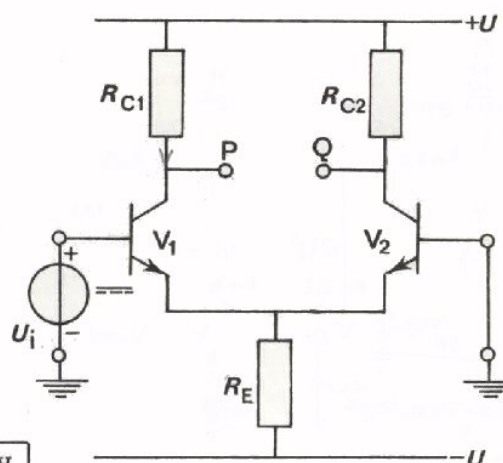
   U_{RE} = [V]

   De spanning op de basis van V_1 is:

   [V] t.o.v. de emitters.

   De spanning op de basis van V_2 is:

   [V] t.o.v. de emitters.



FREQUENTIE-ONAFHANKELIJKE EN FREQUENTIE-AFHANKELIJKE VERZWAKKERS

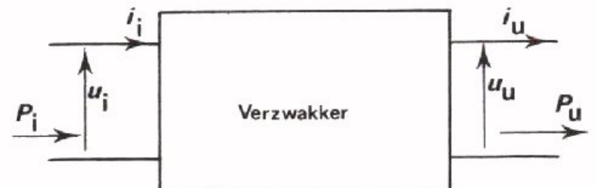
SAMENVATTING

- Onder *verzwakken* verstaat men het verminderen van de grootte van een signaal (stroom, spanning of vermogen) zonder dat daarbij de vorm en de frequentie veranderen.

- De stroomverzwakking is: $V_i = \frac{i_u}{i_i}$

  De spanningsverzwakking is: $V_u = \frac{u_u}{u_i}$

  De vermogensverzwakking is: $V_P = \frac{P_u}{P_i}$

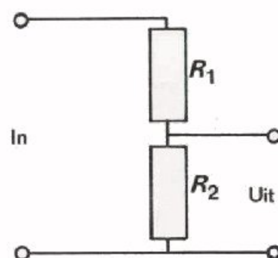


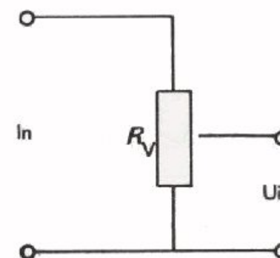
- De vermogensverzwakking wordt vaak in dB's uitgedrukt.

  $V_P = \frac{1}{10} = 10^{-2} = -2$ B $= -$ 20 dB; $V_P = \frac{1}{10\ 000} = 10^{-4} = -4$ B $= -40$ dB.

  Bij achter elkaar geschakelde verzwakkers (en versterkers) berekent men de totale vermogensversterking door de dB's van de afzonderlijke schakelingen op te tellen.

- Spanningsverzwakkers worden het meeste toegepast. Stroom- en vermogensverzwakkers komen minder voor. De eenvoudigste verzwakkers zijn de spanningsdelers, vast of continue regelbaar:





- Men onderscheidt frequentie-onafhankelijke verzwakkers en frequentie-afhankelijke verzwakkers (of filters);

- Belangrijke frequentie-onafhankelijke verzwakkers zijn: ingangsverzwakkers en uitgangsverzwakkers.

  Ingangsverzwakkers vindt men aan de ingang van een elektronische schakeling. Bij deze verzwakkers is van belang:
  - een hoge ingangsweerstand,
  - een constante ingangsweerstand onafhankelijk van de verzwakkerstand.

Uitgangsverzwakkers worden aan de uitgang van een schakeling toegepast. Bij deze verzwakkers is belangrijk:

- een lage uitgangsweerstand,
- een constante uitgangsweerstand onafhankelijk van de verzwakkerstand.

- Frequentie-afhankelijke verzwakkers worden verdeeld in:
  - laagdoorlatende filters,
  - hoogdoorlatende filters,
  - banddoorlatende filters,
  - bandonderdrukkende filters.

TEST UZELF

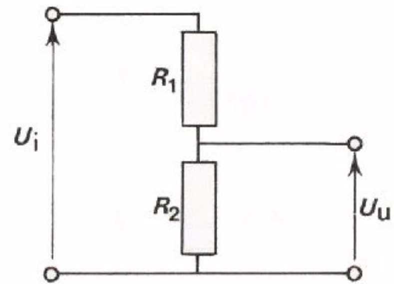
1. Van deze verzwakker is:

   R_1 = 9990Ω en R_2 = 10Ω.

   De ingangsweerstand is R_i = [Ω]

   De uitgangsweerstand is ongeveer

   R_u = [Ω]



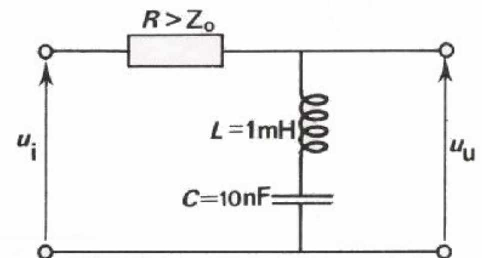
   De verzwakking is V_u = [ ]

   Als R_1 een positieve temperatuurcoëfficient heeft en R_2 een negatieve temperatuurcoëfficient, wat gebeurt er dan met de verzwakking bij toenemende temperatuur ?

   Bij toenemende temperatuur wordt $\frac{u_u}{u_i}$ [**groter/kleiner**]

2. Deze frequentie-afhankelijke verzwakker noemt men een

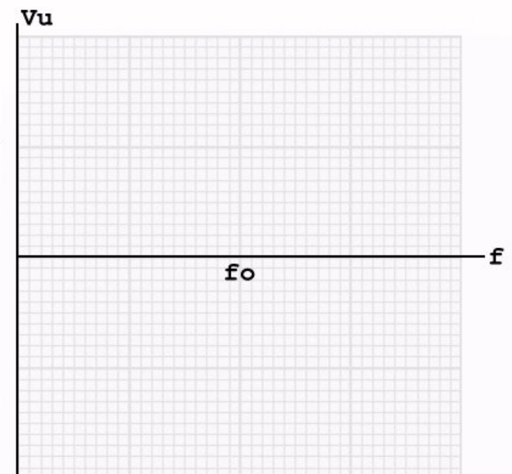
   [ ] filter.



   Bij welke frequentie is u_u/u_i maximaal?

   Dat is bij f_o ≃ [kHz]

   Zet in nevenstaande grafiek de grootte van V_u bij uiteenlopende frequenties,



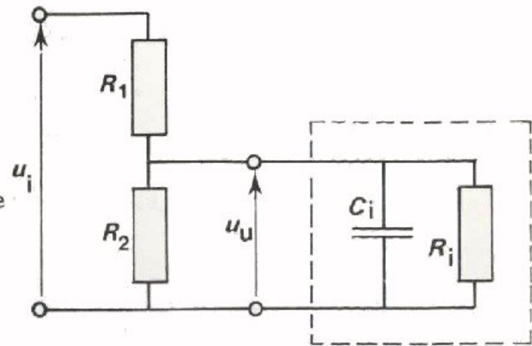
3. Een verzwakker en een versterker zijn achter elkaar geschakeld. De verzwakker verzwakt -12 dB; de versterker versterkt 32 dB.

   Hoe groot is de totale vermogensversterking ? A_p = [dB]

   Druk de vermogensversterking uit in een verhoudingsgetal. A_p = [ ]

ENIGE BIJZONDERE VERZWAKKERS (zie C10)

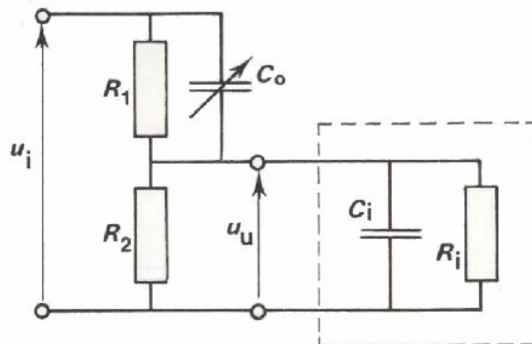
- Een hoogohmige weerstandsverzwakker gaat bij hogere frequenties afwijken ten gevolge van de ingangscapaciteit van de schakeling die op de uitgang van de verzwakker is geplaatst. Ten gevolge van C_i neemt de verzwakking $\frac{u_u}{u_i}$ bij hogere frequenties toe.



- Deze afwijking kan men corrigeren door middel van een capaciteit (C_o) die parallel aan R_1 is geschakeld. Men kan C_o zodanig instellen dat $\frac{u_u}{u_i}$ onafhankelijk van de frequentie wordt. De juiste waarde van C_o kan men berekenen uit:

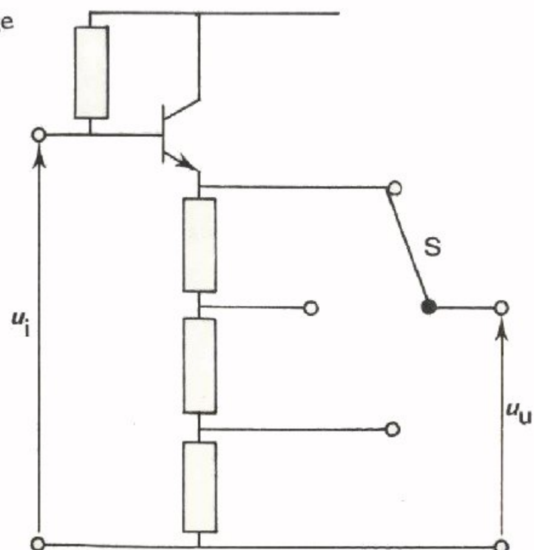
$$C_o = \frac{R_v}{R_1} \cdot C_1$$

R_v is de vervangingsweerstand van R_2 parallel aan R_i.



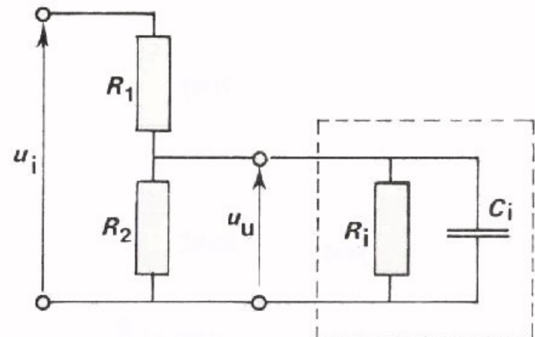
- De correctiecapaciteit C_o kan men afregelen met behulp van een kanteelspanning. Men sluit een kanteelspanning op de ingang van de verzwakker aan. Daarna regelt men aan C_o totdat de uitgangsspanning ook kanteelvormig wordt. De verzwakkermeetkop van een oscilloscoop wordt op deze wijze afgeregeld.

- Actieve verzwakkers zijn verzwakkers waarin actieve componenten(bijv. electronenbuizen of transistors) worden toegepast. Met behulp van een emittervolger kan een verzwakker met een hoge ingangsweerstand en een lage uitgangsweerstand worden samengesteld. Frequentie-correctie is bij dit soort verzwakkers meestal niet nodig.



TEST UZELF

1. Van nevenstaande verzwakker is gegeven:



R_1 = 900 kΩ; R_2 = 200 kΩ,
R_i = 200 kΩ en C_i = 180 pF.

- De vervangingsweerstand van R_2 en R_i is:

  R_V = [kΩ]

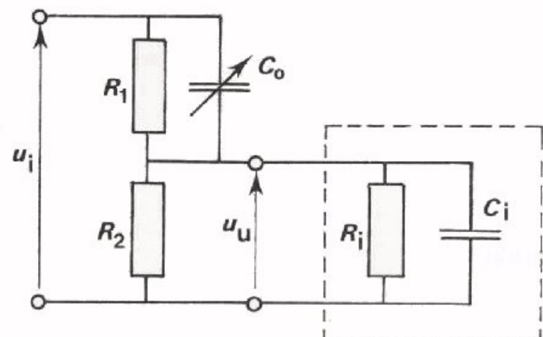
- De verzwakking bij lage frequenties (waarbij C_i kan worden verwaarloosd) is:

  V_u = [ ]

- De verzwakking bij hoge frequenties (waarbij C_i niet kan worden verwaarloosd) is

  [**groter/kleiner**] dan bij lage frequenties.

2. Bovenstaande verzwakker wordt gecorrigeerd m.b.v. de condensator C_o.



De juiste waarde voor C_o wordt:

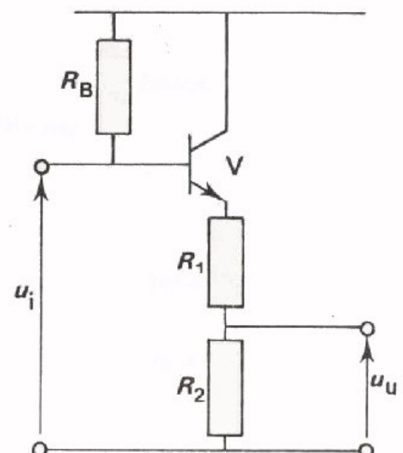
C_o = [pF]

De verzwakking is nu voor alle frequenties:

V_u = [ ]

3. Van deze verzwakker is gegeven:

h_{fe} = 200, R_B = 200 kΩ,
R_1 = 990Ω en R_2 = 10Ω.



Hoe groot is bij benadering:

De verzwakking $V_u \simeq$ [ ]

De ingangsweerstand $R_i \simeq$ [kΩ]

De uitgangsweerstand $R_u \simeq$ [Ω]

C 13

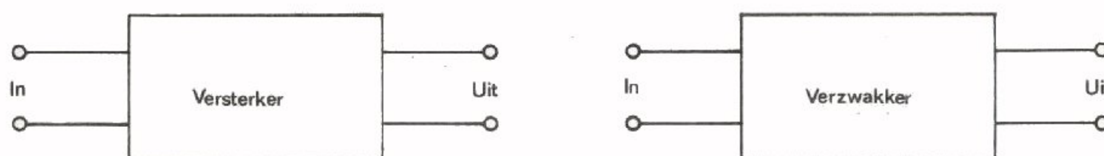
HERHALING II

DE METINGEN VAN C3 T/M C10

INLEIDING

In C11 hebben we de *theorie* van de lessen C3 en C10 herhaald. Deze les wordt besteed aan het herhalen van de *metingen* die we tot nog toe hebben uitgevoerd.

In de lessen C3 t/m C10 zijn twee groepen van schakelingen aan de orde geweest; nl. schakelingen met de functie *versterken* en schakelingen met de functie *verzwakken*. Als het uitsluitend is te doen om de *functie* van de schakeling, kan men een versterker of een verzwakker eenvoudig voorstellen door een blok met een ingang en een uitgang.



De voor de praktijk belangrijke eigenschappen van deze blokken zijn:
- de ingangsweerstand
- de uitgangsweerstand
- de overdrachtseigenschappen (versterking, verzwakking, fasedraaiing).

Voor een electronica-monteur is het noodzakelijk dat hij deze eigenschappen kan vaststellen door metingen aan de *uitwendige* aansluitklemmen van de schakelingen. Elektronische schakelingen worden immers steeds vaker in blokvorm toegepast. Een aantal van deze blokken vormt een elektronisch systeem. Als zo'n systeem moet worden gerepareerd of gecontroleerd kan dat alleen door stroom- en spanningsmetingen aan de ingangen en/of uitgangen van de blokken.

WAT GAAN WE IN DEZE LES ACHTEREENVOLGENS DOEN ?

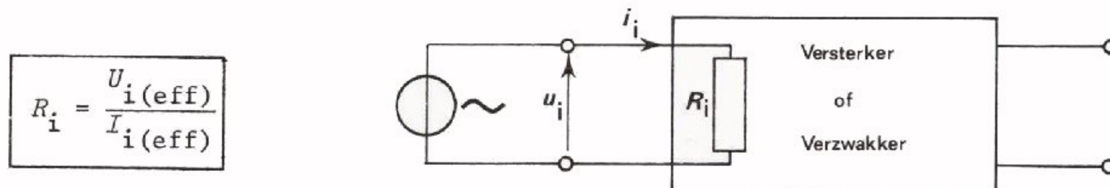
We beginnen deze les met nogmaals uit te leggen hoe de belangrijkste metingen aan versterkers en verzwakkers verlopen. Vervolgens geven we een aantal algemene "tips", die bij het opzetten van meetopstellingen en bij het uitvoeren van metingen nuttig kunnen zijn. Tenslotte krijgt U een meetopdracht waarbij het geleerde kan worden toegepast. Als U daarbij moeilijkheden ondervindt, raadpleeg dan Uw leraar. Bij de volgende les dient U in staat te zijn, zonder hulp van docent of collega, een metingtest uit te voeren,

HOE METEN WE DE INGANGSWEERSTAND VAN EEN VERSTERKER OF EEN VERZWAKKER ?

METHODE 1

We leggen een sinusvormige spanning aan de ingang van de schakeling. We meten meten de spanning over-, en de stroom door de ingangsweerstand R_i. Daarna delen we de meetresultaten op elkaar.

$$R_i = \frac{U_{i(eff)}}{I_{i(eff)}}$$



Het meten van u_i levert gewoonlijk geen moeilijkheden op. $U_{i(t)}$ is bijv. 10 mV. Zo'n spanning kan gemakkelijk m.b.v. een oscilloscoop worden gemeten. Het meten van i_i geeft echter wel problemen als R_i groot is. Is bijv. R_i = 1 MΩ, dan is bij U_{it} = 10 mV de i_i gelijk aan:

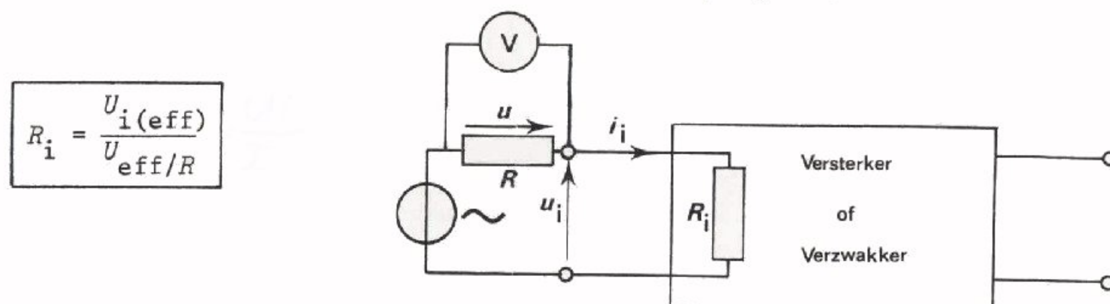
$$I_{it} = \frac{U_{it}}{R_i} = \frac{10.10^{-3}}{10^6} = 10^{-8}\ \text{A} = 0{,}01\ \mu\text{A}$$

We hebben geen wisselstroommeters om zo'n kleine stroom te meten.

METHODE 2

Een andere methode om i_i te meten is die waarbij een *bekende* weerstand in serie met de ingang wordt geschakeld (zie figuur). We meten dan de *spanning* u over deze R en berekenen daarna $I_{i(eff)} = \frac{U_{eff}}{R}$

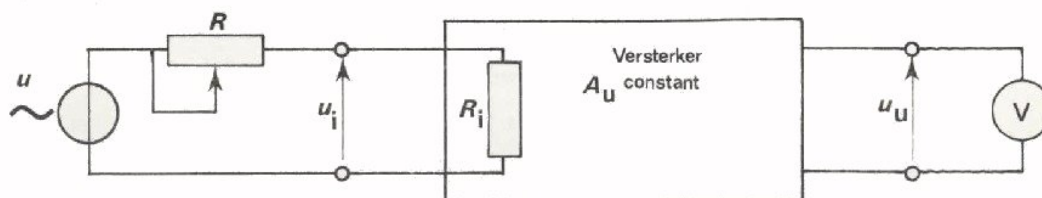
$$R_i = \frac{U_{i(eff)}}{U_{eff/R}}$$



In geval van grote R_i geeft deze methode toch weer moeilijkheden. Kiezen we R groot (bijv. 1 MΩ), dan maken we al gauw een flinke meetfout doordat de R_i van de voltmeter parallel aan de R komt te staan. Kiezen we R klein (bijv. 100Ω), dan wordt de spanning u te klein om goed gemeten te kunnen worden. Een oplossing voor al deze problemen biedt de meetmethode die op het volgende blad wordt behandeld.

METHODE 3 (voor versterkers)

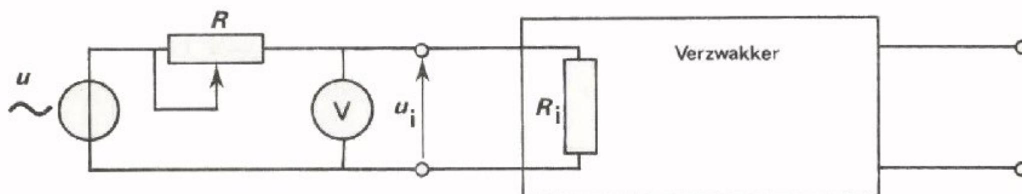
We plaatsen een variabele weerstand R in serie met de versterkeringang volgens onderstaand schema.



We beginnen met R kort te sluiten, zodat $u_i = u$. We meten de uitgangsspanning $U_{u(eff)}$ en stellen de grootte van u zo in, dat $U_{u(eff)}$ een goed afleesbare waarde heeft (bijv. 1 V). Daarna verwijderen we de kortsluiting en stellen R zo in, dat $U_{u(eff)}$ tot op de helft is gezakt (dus tot 0,5 V). *Omdat A_u constant is*, zal $U_{i(eff)}$ dan óók tweemaal zo klein zijn geworden. Dit laatste betekent dat de helft van $U_{(eff)}$ over R_i staat en de andere helft over R. Dus $R_i = R$. We kunnen tenslotte R losnemen en zijn waarde met een ohmmeter bepalen.

METHODE 3 (voor verzwakkers)

Bij verzwakkers is de uitgangsspanning over het algemeen kleiner dan de ingangsspanning. We hebben wel eens ervaren dat kleine spanningen moeilijker te meten zijn dan grote spanningen. Daarom kan men bij het meten van de ingangsweerstand van een verzwakker soms beter aan de ingang dan aan de uitgang spanningsmetingen verrichten. De meting verloopt dan als volgt:

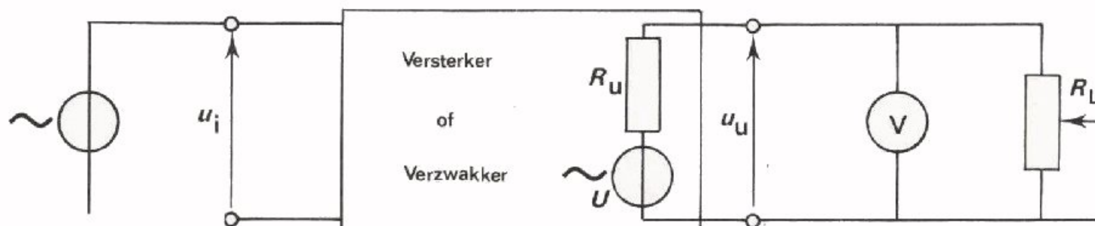


Eerst meten we de ingangsspanning van de verzwakker bij een kortgesloten R. De spanning $U_{i(eff)}$ is dan gelijk aan U_{eff} (bijv. 1 V). Daarna verwijderen we de kortsluiting en regelen R zodanig dat de voltmeter 0,5 V aanwijst. Over R staat dan ook 0,5 V. Dus $R_i = R$. We nemen R los en bepalen de waarde m.b.v. een ohmmeter.

HOE METEN WE DE UITGANGSWEERSTAND VAN EEN VERSTERKER OF EEN VERZWAKKER ?

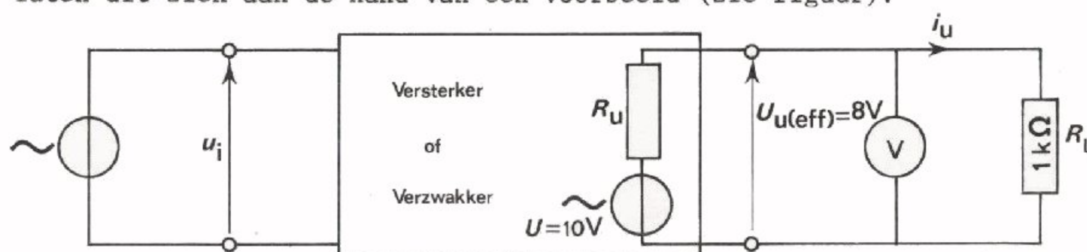
METHODE 1

Aan de ingang wordt een spanning u_i aangesloten. Dan wordt eerst de uitgangsspanning zónder belasting gemeten. Dat is de waarde van u in onderstaand schema. Daarna wordt R_L aangesloten en zó geregeld, dat u_u de helft wordt van u . In dat geval is $R_L = R_u$. Door R_L m.b.v. een ohmmeter te meten is de waarde van R_u bekend.



METHODE 2

Praktisch is het niet altijd toelaatbaar om een versterker of een verzwakker te belasten met een R_L die gelijk is aan R_u. Bij vele versterkers en ook bij sommige verzwakkers ontstaat nl. een vervormd uitgangssignaal bij belasting met een lage weerstand. Hoe dán de R_u meten ? We laten dit zien aan de hand van een voorbeeld (zie figuur).



We gaan weer eerst de open uitgangsspanning U_{eff} meten. Stel dat deze 10 V is. Vervolgens belasten we de versterker met een toelaatbare weerstand R_L en meten de klemspanning $U_{u(eff)}$. Stel dat R_L = 1 kΩ en de gemeten $U_{u(eff)}$ = 8 V bedraagt. De R_u-waarde is dan als volgt te berekenen.

Uit $U_{u(eff)}$ = 8 V en R_L = 1 kΩ volgt:

$$I_{u(eff)} = \frac{U_{u(eff)}}{R_l} = \frac{8}{1000} = 8.10^{-3}\text{A}.$$

Verder is de spanning over $U_{Ru(eff)} = U_{eff} - U_{u(eff)} = 10 - 8 = 2$ V

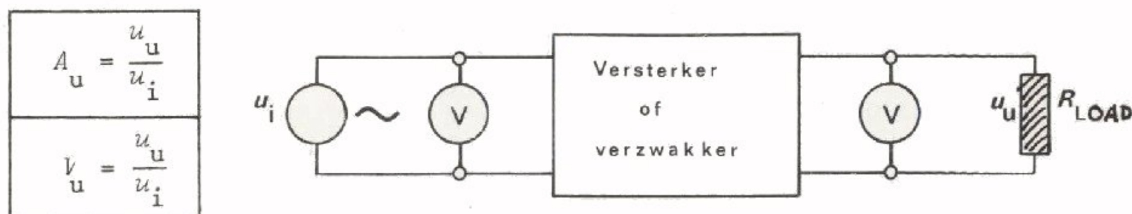
Tenslotte is: $$R_u = \frac{U_{u(eff)}}{I_{u(eff)}} = \frac{2}{8.10^{-3}} = 250\Omega\ .$$

HET METEN VAN DE OVERDRACHTSEIGENSCHAPPEN

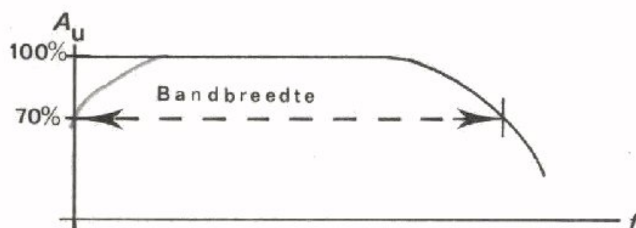
DE SPANNINGSVERSTERKING OF DE SPANNINGSVERZWAKKING

We leggen een sinusvormige spanning aan de ingang van de versterker of verzwakker. We meten deze spanning (u_i) en tevens de uitgangsspanning(u_u). Uit deze meetresultaten wordt de spanningsversterking resp. spanningsverzwakking berekend.

$A_u = \frac{u_u}{u_i}$
$V_u = \frac{u_u}{u_i}$



Voor het bepalen van de amplitude-frequentiekarakteristiek gaat men als volgt te werk. Men stelt de *frequentie* van de ingangsspanning telkens op een andere waarde in, terwijl de *amplitude* van u_i constant wordt gehouden. Bij elke ingestelde frequentie wordt de uitgangsspanning gemeten, waarna de versterking resp. verzwakking kan worden berekend. Een goed overzicht van de meetresultaten verkrijgt men door deze in een grafiek uit te zetten.



DE STROOM- EN VERMOGENSOVERDRACHT

Als van een versterker of van een verzwakker de ingangsweerstand de uitgangsweerstand en de spanningsversterking bekend zijn, kunnen de stroom- en vermogensoverdracht worden berekend.

De ingangsstroom is: $i_i = u_i / R_i$

De uitgangsstroom is: $i_u = u_u / R_L$

De stroomoverdracht is: A_i of $V_i = \frac{u_u / R_L}{u_i / R_i}$

Het ingangsvermogen is: $P_i = U^2_{i(eff)} / R_i$

Het uitgangsvermogen is: $P_u = U^2_{u(eff)} / R_L$

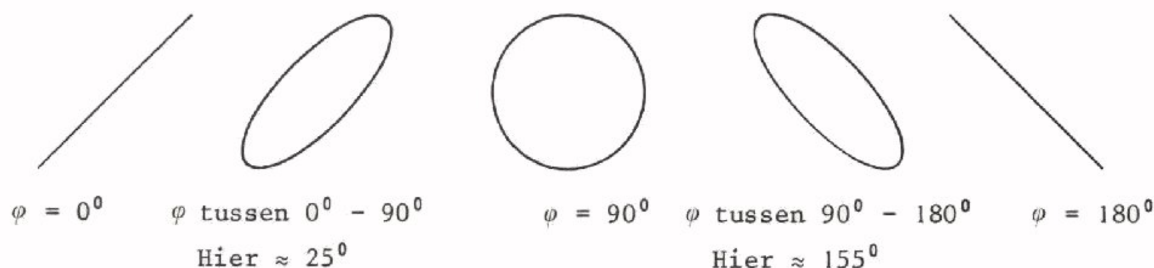
De vermogensoverdracht is: A_p of $V_p = \frac{U^2_{u(eff)} / R_L}{U^2_{i(eff)} / R_i}$

DE FASEVERSCHUIVING TUSSEN INGANG- EN UITGANGSSPANNING

METHODE I: MET BEHULP VAN LISSAJOUSFIGUREN

De ene spanning legt men aan het Y-kanaal; de andere spanning aan het X-kanaal van een oscilloscoop. Onder invloed van beide spanningen beschrijft de electronenstraal een *lissajousfiguur*.
Uit deze figuur kan men de fasehoek tussen beide spanningen bepalen.

LISSAJOUSFIGUREN



$\varphi = 0^0$ φ tussen $0^0 - 90^0$ Hier $\approx 25^0$ $\varphi = 90^0$ φ tussen $90^0 - 180^0$ Hier $\approx 155^0$ $\varphi = 180^0$

METHODE 2: DOOR EXTERNE TRIGGERING VAN EEN OSCILLOSCOOP

De ingangs- OF uitgangsspanning van de schakeling (gunstige waarde ca. 1 V) legt men aan de triggeringang van de oscilloscoop. De oscilloscoop zelf wordt op "externe triggering" geschakeld. Daarna verbinden we *achtereenvolgens* de ingang en de uitgang van de schakeling met het Y-kanaal van de oscilloscoop. De te meten spanningen worden dan in de juiste fase afgebeeld. Is de uitgangsspanning bijv. 180^0 in fase verschoven t.o.v. de ingangsspanning, dan zien we achtereenvolgens een oscillogram volgens fig. a resp. fig. b. (of omgekeerd).

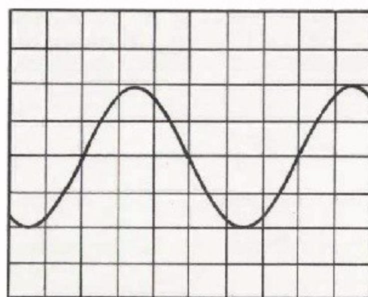


Fig. a

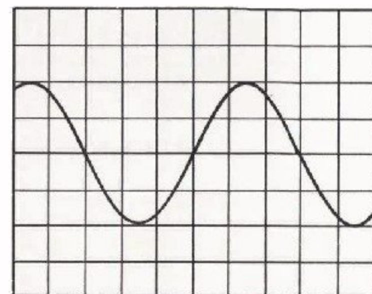


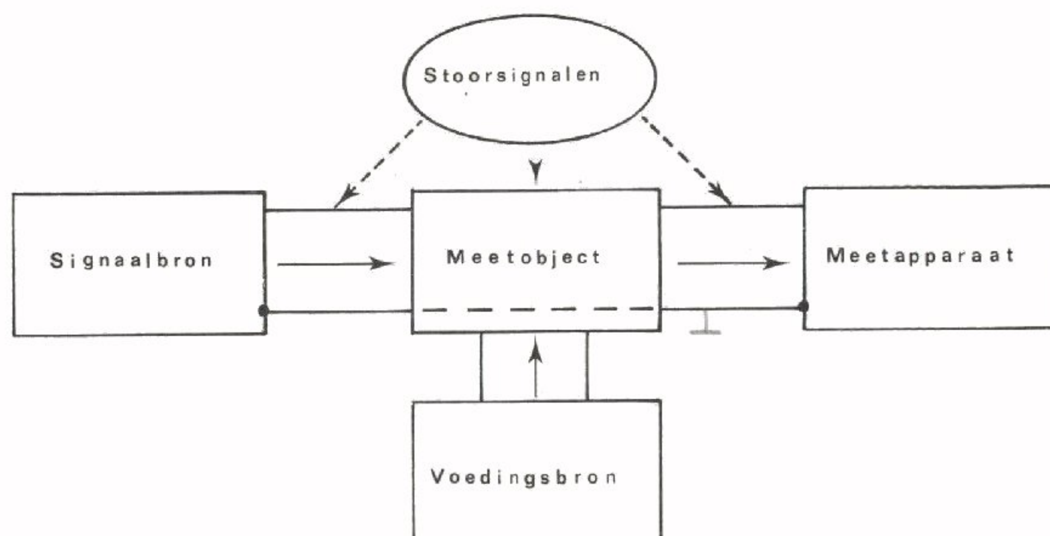
Fig. b

HET VOORKOMEN VAN MEETFOUTEN

Bij metingen aan versterkers of verzwakkers moet men altijd ervoor zorgen dat de schakeling een onvervormd uitgangssignaal geeft. In dit verband is het raadzaam een oscilloscoop op de uitgang aan te sluiten. Als het verloop van de uitgangsspanning zichtbaar afwijkt van de sinusvorm moet men, om meetfouten te voorkomen, het ingangssignaal *kleiner* maken.

WAAROP MOET MEN LETTEN BIJ HET MAKEN VAN EEN MEETOPSTELLING ?

Bij het uitvoeren van electronische metingen heeft men dikwijls te maken met een situatie zoals in onderstaande figuur is weergegeven.



Het *meetobject* is bijv. een versterker waarvan de ingangsweerstand moet worden gemeten. Een *signaalbron* (bijv. een LF-generator) levert de benodigde spanning op de ingang van de versterker. Een *voedingsbron* zorgt voor de gewenste gelijkspanning. De uitgangsspanning van de versterker wordt m.b.v. *meetapparaten* (bijv. een oscilloscoop) gemeten. De gehele meetopstelling, maar vooral het meetobject en de verbindingen mét het meetobject, zijn onderhevig aan uitwendige stoorsignalen (bijv. storingen ten gevolge van elektrische en magnetische velden afkomstig van het sterkstroomnet).

Bij het opbouwen van een meetopstelling dient men op de volgende punten te letten:

1. In verband met de overzichtelijkheid van de meetopstelling dient het aanbeveling de diverse apparaten steeds op dezelfde wijze t.o.v. het meetobject te plaatsen. Bij voorkeur de signaalbron links van het meetobject, de meetinstrumenten rechts van het meetobject en de voedingsbron in het midden (zie bovenstaande tekening).

2. De verbindingen met het meetobject dient men zodanig te maken dat de "aardkanten" met elkaar verbonden zijn. De aardklem van de uitgang van de signaalbron en ook de aardklem van de ingang van het toegepaste meetapparaat moeten verbonden worden met de aardkant van het meetobject.

3. Als men bij het meten last heeft van stoorsignalen moet men tussen de signaalbron en het meetobject en/of tussen het meetapparaat en het meetobject afgeschermde snoeren gebruiken.

ENKELE REGELS BIJ HET METEN

1. Kies de gebruikte signaalbron en de meetapparaten.

- Bij het kiezen van een signaalbron moet men letten op de vorm, de frequentie en de amplitude van de uitgangsspanning. Bovendien kan de uitgangsweerstand van belang zijn.
- Bij de keuze van een meetapparaat is de ingangsweerstand, de gevoeligheid en het frequentiebereik van belang. Soms speelt de nauwkeurigheid een rol.
- Bij een voedingsbron moet men kijken naar de spanning en de stroom, die het apparaat kan leveren. Soms is het van belang dat de "+" en "-" vrij van "aarde" liggen.

2. Stel de apparaten op de juiste wijze in.

- Zorg dat de uitgangsspanning van de signaalbron niet te hoog is. Door een te hoge spanning kan het ingangscircuit van het meetobject defect raken. Een spanning van ca. 1 V is om te beginnen meestal een "veilige" waarde.
- Bij stroom- en spanningsmeters moet men een bereik inschakelen waarvan men zeker weet dat het groot genoeg is. Dit om een overbelasting van de meter te voorkomen. Bij gebruik van een universeelmeter moet men onderscheid maken tussen de spanningsstanden (⎓ en ∿), de stroomstanden (⎓ en ∿) en de Ω-standen. Vooral in de gevoelige stroomstanden en in de Ω-standen is een universeelmeter bijzonder kwetsbaar als in deze standen per ongeluk spanning wordt gemeten. Als m.b.v. een oscilloscoop het verloop van een stroom of van een spanning moet worden afgebeeld, wordt de interne "X-deflectie" en de "interne triggering" ingeschakeld. Als men twee signalen met elkaar wil vergelijken (bijv. bij fasemetingen), wordt "externe X-deflectie" toegepast. Verder moet men bij een oscilloscoop de AC- en DC-ingang op de juiste wijze gebruiken.
- Het voedingsapparaat moet op de gewenste spanning worden ingesteld. De uitgang van de voeding nog niet met het meetobject verbinden. De stroombegrenzing instellen op een waarde die iets groter is dan de stroom die men denkt af te nemen. Als nu door bijv. een foutieve aansluiting de afgenomen stroom veel groter is, treedt automatisch de beveiliging van het voedingsapparaat in werking.

3. Verbindt de voedingsspanning met het meetobject en houdt in de gaten of de te verwachten stroom gaat lopen. Zo niet, dan de spanning direct uitschakelen en nagaan waar de fout zit.

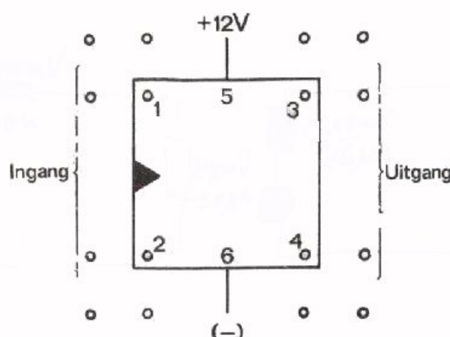
4. Regel de amplitude en de frequentie van de signaalbron op waarden waarbij men de metingen wil verrichten.

5. Schakel de meetbereiken van de meetapparaten op een zodanig lagere stand, dat een zo groot mogelijke meteruitslag of een zo groot mogelijk oscillogram ontstaat.

6. Bepaal de te meten grootheden, en noteer de meetresultaten bij voorkeur in tabellen of grafieken.

HERHALINGSOPDRACHT: METINGEN AAN EEN VERSTERKER

Monteer blok 2 (een versterker) op Uw paneel.



- Belast de uitgang van de versterker met een weerstand van 10 kΩ, en schakel de voedingsspanning in.
- Meet m.b.v. de stroom- en spanningsmeters, bij een frequentie van 1 kHz:

● De ingangsweerstand R_i =

● De uitgangsweerstand R_u =

● De spanningsversterking A_u =

- Bereken aan de hand van deze meetresultaten:

● De stroomversterking A_i =

● De vermogensversterking A_p =

- Meet m.b.v. een oscilloscoop, bij een frequentie van 1 kHz:

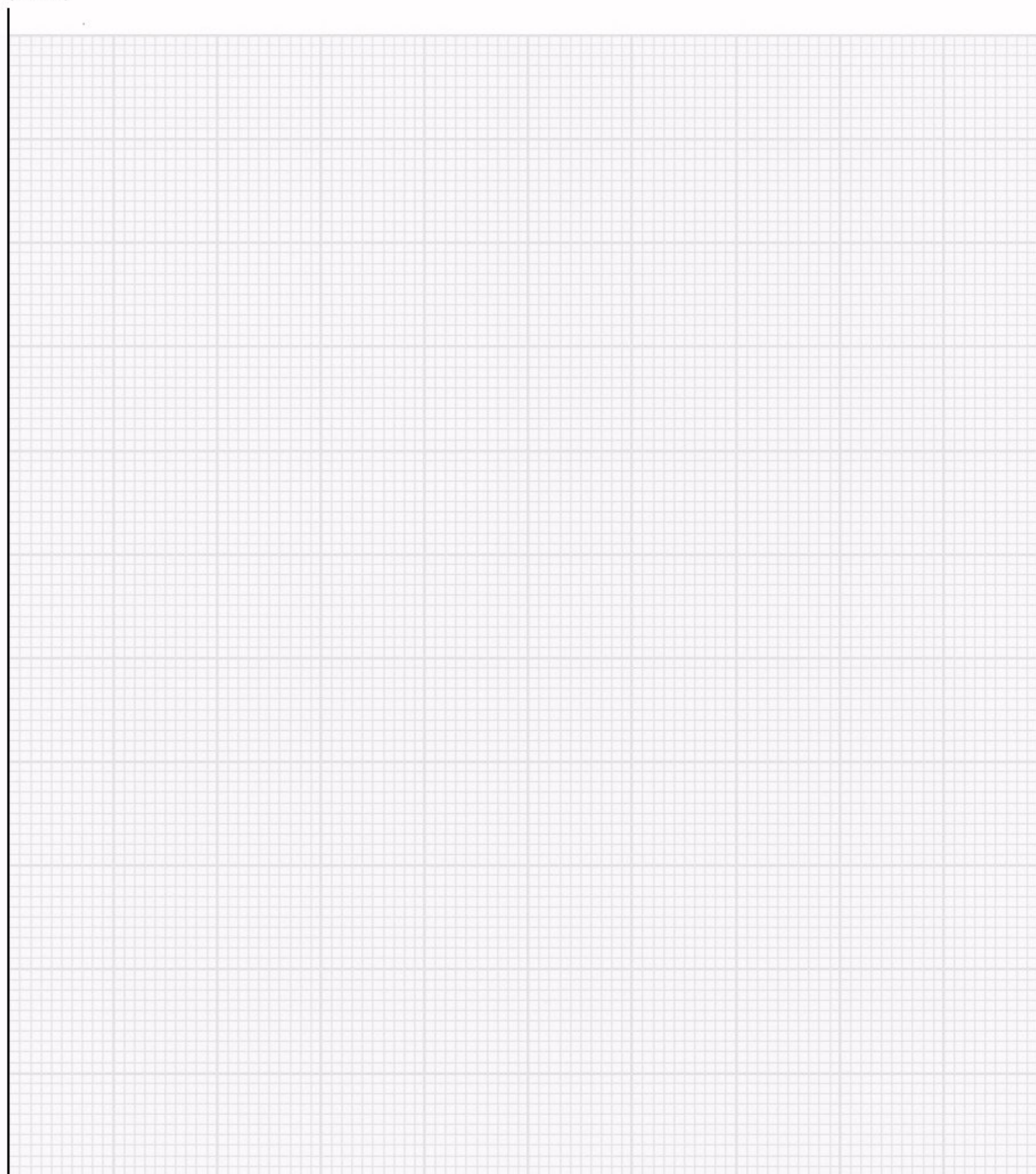
● de fasehoek tussen in- en uitgangsspanning

φ =

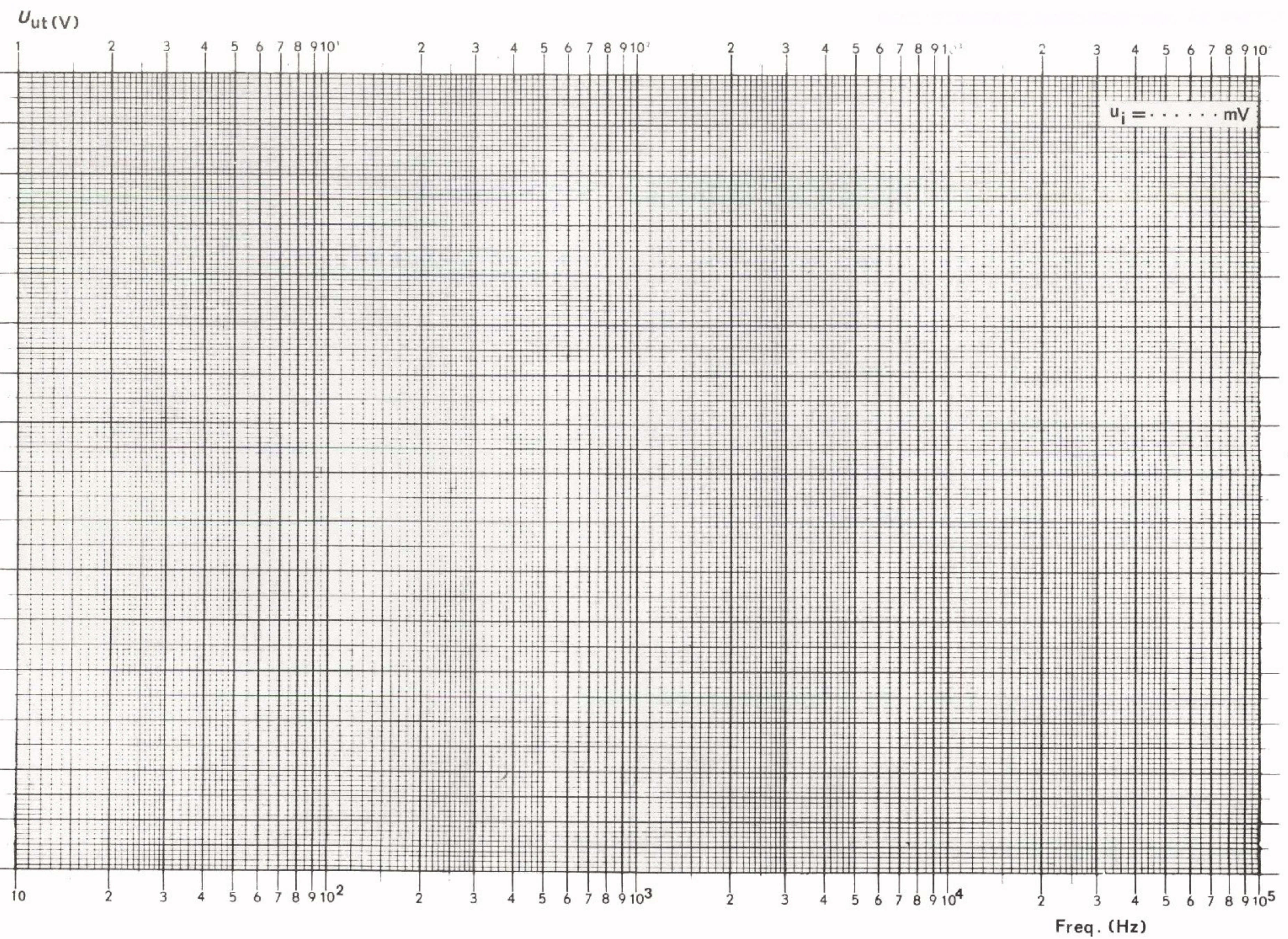
● De uitgangsspanning bij ingangsspanningen tussen 0,1 V en 1 V (meet-topwaarden !). Zet de meetresultaten uit in een grafiek op blad C13 - 10 en beantwoordt de bijbehorende vragen op blad C13-13.

- Schakel een condensator van 1 nF parallel aan R_L.
  Meet van de aldus belaste versterker de amplitude-frequentie-karakteristiek tussen 15 Hz en 100 kHz.
  Zet de meetresultaten uit in een grafiek op blad C13-12 en beantwoordt de bijbehorende vragen op blad C13-13.

VERVOLG HERHALINGSOPDRACHT



C13.12



VRAGEN BEHORENDE BIJ DE GRAFIEK VAN BLAD C13-11

Verklaar de "knik" van een grafiek.

Als we stellen dat de uitgangsspanning van de versterker sinusvormig moet zijn, hoe groot is dan bij R_L = 10 kΩ:

- De maximale ingangsspanning ? U_{it} = [V]
- De maximale ingangsstroom ? I_{it} = [µA]
- De maximale uitgangsspanning ? U_{ut} = [V]
- De maximale uitgangsstroom ? I_{ut} = [µA]

VRAGEN BEHORENDE BIJ DE GRAFIEK VAN BLAD C13-12

Verklaar de "daling" van de grafiek aan de hoge frequentie-kant bij een capacitieve belasting.

- Uit de grafiek kan men zien dat de versterker is

gelijkspanningsgekoppeld/wisselspanningsgekoppeld

- De bandbreedte van de versterker bij een capacitieve belasting van 1 nF is B =
- Bij het opnemen van de amplitude-frequentie-karakteristiek is onze universeelmeter ongeschikt omdat:

